



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

***RİBES NİGRUM* L. MEYVE ÖZÜTÜ KULLANILARAK ZnO
NANOPARTİKÜLLERİN YEŞİL SENTEZİ,
KARAKTERİZASYONU VE ENERJİ DEPOLAMA
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mehmet Ferman BARAN

**Kasım-2025
BATMAN**

T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

***RİBES NİGRUM* L. MEYVE ÖZÜTÜ KULLANILARAK ZnO
NANOPARTİKÜLLERİN YEŞİL SENTEZİ,
KARAKTERİZASYONU VE ENERJİ DEPOLAMA
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mehmet Ferman BARAN

Danışman
Prof. Dr. Abdulkadir LEVENT

Diğer Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Cafer SAKA

Dr. Öğr. Üyesi Selma EKİNCİ

Kasım-2025
BATMAN

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet Ferman BARAN tarafından hazırlanan “*Ribes Nigrum L.* Meyve Özütü Kullanılarak ZnO Nanopartiküllerin Yeşil Sentezi, Karakterizasyonu ve Enerji Depolama Özelliklerinin Araştırılması” adlı tez çalışması 20/11/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kimya Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Cafer SAKA

Danışman

Prof. Dr. Abdulkadir LEVENT

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Selma EKİNCİ

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

İmza

Mehmet Ferman BARAN

Tarih: 20/11/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

***RİBES NİGRUM L.* MEYVE ÖZÜTÜ KULLANILARAK ZnO NANOPARTİKÜLLERİN YEŞİL SENTEZİ, KARAKTERİZASYONU VE ENERJİ DEPOLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mehmet Ferman BARAN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Kimya Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Abdulkadir LEVENT

2025, 59 Sayfa

Bu tez çalışmasında, *Ribes Nigrum L.* (Siyah Frenk Üzümü) bitkisinin meyve özütü kullanılarak çevre dostu yeşil sentez yöntemiyle çinko oksit nanopartikülleri sentezlenmiştir. Bu sentez protokolünde, *Ribes Nigrum L.* meyve özütünün indirgeyici özelliğinden yararlanılmıştır. Elde edilen *Ribes Nigrum L.* temelli çinko oksit nanopartiküllerinin yapısal, morfolojik ve kimyasal özellikleri X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu, fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi, zeta potansiyel ölçümü, UV-Görünür bölge spektroskopisi, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi ve termogravimetrik analiz teknikleriyle yapılmıştır.

Sentezlenen *Ribes Nigrum* kökenli çinko oksit nanopartiküllerinin enerji depolama performansı, döngüsel voltametri, galvanostatik şarj-deşarj ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Galvanostatik şarj-deşarj ölçümleri sonucunda, sülfürik asit ortamında 0.08 Ag⁻¹ akım yoğunluğunda 315.46 Fg⁻¹ özgül kapasitans değeri elde edilmiştir. Ayrıca, 5000 döngü sonunda başlangıç kapasitansının %90.84'ünün korunması, geliştirilen malzemenin yüksek çevrim kararlılığına sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Siyah Frenk Üzümü, *Ribes Nigrum L.*, çinko oksit nanopartikül, yeşil sentez, süperkapasitör

ABSTRACT

MASTER THESIS

GREEN SYNTHESIS, CHARACTERIZATION, AND INVESTIGATION OF ENERGY STORAGE PROPERTIES OF ZnO NANOPARTICLES USING RIBES NIGRUM L. FRUIT EXTRACT

Mehmet Ferman BARAN

Batman University Graduate Education Institute

Department of Chemistry

Advisor: Prof. Dr. Abdulkadir LEVENT

2025, 59 Pages

In this thesis study, zinc oxide nanoparticles were synthesized using the fruit extract of *Ribes Nigrum L.* (blackcurrant) through an environmentally friendly green synthesis approach. During the synthesis process, the reducing capability of *Ribes Nigrum L.* fruit extract was utilized as a natural reducing and stabilizing agent. The structural, morphological, and chemical characteristics of the *Ribes Nigrum*-based zinc oxide nanoparticles were analyzed using X-ray diffraction, scanning electron microscopy, Fourier-transform infrared spectroscopy, zeta potential analysis, UV–Visible spectroscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, and thermogravimetric analysis.

The energy storage performance of the synthesized *Ribes Nigrum*-derived zinc oxide nanoparticles was evaluated by cyclic voltammetry, galvanostatic charge–discharge, and electrochemical impedance spectroscopy techniques. From the galvanostatic charge–discharge measurements, a specific capacitance value of 315.46 Fg^{-1} was obtained at a current density of 0.08 Ag^{-1} in a sulfuric acid electrolyte. Moreover, after 5000 consecutive charge–discharge cycles, 90.84% of the initial capacitance was retained, indicating excellent cycling stability and long-term electrochemical durability of the developed material.

Keywords: *Ribes nigrum*, blackcurrant, zinc oxide nanoparticles, green synthesis, supercapacitor.

ÖN SÖZ

"*Ribes Nigrum L.* Meyve Özütü Kullanılarak ZnO Nanopartiküllerin Yeşil Sentezi, Karakterizasyonu ve Enerji Depolama Özelliklerinin Araştırılması" başlıklı bu yüksek lisans tez çalışması, yoğun bir emek ve destek süreci sonunda tamamlanmıştır. Bu yolculukta bana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen birçok değerli insana içten şükranlarımı sunarım.

Her şeyden önce, bu tezin temelini oluşturan ZnO nanopartiküllerinin yeşil sentezi aşamasında, değerli bilgi birikimini ve laboratuvar imkanlarını benimle cömertçe paylaşan Batman Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Gıda İşleme Bölümü Başkanı Sayın Doç. Dr. Mehmet Fırat BARAN hocama en derin teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin yol göstericiliği ve destekleri bu çalışmanın hayata geçmesinde kritik bir rol oynamıştır.

Yüksek lisans eğitimim boyunca, başlangıcından itibaren her aşamada bilgisi, tecrübesi ve sonsuz motivasyonu ile yanımda olan, çalışmalarımı büyük bir özveriyle yönlendiren ve her konuda desteklerini esirgemeyen değerli danışmanım, Kimya Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Abdulkadir LEVENT'e şükranlarımı sunarım. Kendisi, yalnızca bir hoca olmanın ötesinde, ilmi duruşu ve örnek kişiliği ile hayatıma yön veren bir rehber olmuştur. Bu çalışmanın her aşamasındaki değerli katkıları için kendisine minnettarım.

Ayrıca, tez sürecimde görüş ve önerileriyle katkıda bulunan tüm hocalarıma, laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarıma ve beni her koşulda anlayışla karşılayıp destek olan aileme en kalbi duygularıyla teşekkür ederim.

Bu araştırmanın, bilim dünyasına ve gelecekte yapılacak çalışmalara faydalı olmasını temenni ederim.

Mehmet Ferman BARAN
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER/TABLolar LİSTESİ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1 Süperkapasitörlerin temel yapısı ve elektrot malzemeleri	5
2.2 Yeşil sentez tekniği kullanılarak sentezlenen elektrot malzemesi.....	9
3. YÖNTEM	11
3.1. Elektrokimyasal analiz yöntemleri	11
3.1.1. Döngülü voltammetri	12
3.1.2. Galvanostatik şarj-deşarj.....	13
3.1.3. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi	14
3.2. Yapısal ve morfolojik analizler.....	15
3.3. Kimyasallar	16
3.4 <i>Ribes Nigrum L.</i> ile İlgili Genel Bilgiler.....	16
3.5 RN@ZnO nanopartiküllerinin yeşil sentezi.....	18
3.5 Elektrot malzemesinin hazırlanması	19
3.6 Elektrokimyasal ölçümler	20
3.7 Spesifik kapasitansın hesaplanması	21
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	22
4.1. <i>Ribes Nigrum L.</i> ve ZnO nanopartiküllerin karakterizasyonu	22
4.1.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Analiz sonuçları	22
4.1.2. UV-Vis Analiz sonuçları	24
4.1.3. Taramalı Elektron Mikroskobu Analiz sonuçları	25
4.1.4. Enerji dağılımlı X-Işını spektroskopisi analiz sonuçları.....	26
4.1.5. X-ışını difraksiyonu analiz sonuçları	27
4.1.6. Termogravimetrik Analiz sonuçları.....	28
4.1.7. Dinamik Işık Saçılımı Analiz sonuçları.....	30
4.1.8. Zeta Potansiyel analiz sonuçları	30
4.2. Elektrokimyasal karakterizasyon sonuçları	31
4.2.1. Döngülü Voltammetri Sonuçları.....	32
4.2.2 Şarj-Deşarj Analiz Sonuçları.....	34

4.2.3 Elektrokimyasal empedans spektroskopisi	38
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	41
KAYNAKLAR	43



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3. 1. Ribes Nigrum L. (Kuş Özümü) Taksonun Dağılımı.....	18
Şekil 4. 1. RN bitkisi ve RN@ZnO nanopartiküllerinin FTIR Spektrumu.....	23
Şekil 4. 2. RN özütü kullanılarak biyosentezlenen RN-ZnO NP'lerin UV/Görünür spektrumu.....	25
Şekil 4. 3. RN@ZnO Nanopartiküllerinin SEM görüntüsü.....	26
Şekil 4. 4. RN@ZnONPs numunesinin EDX sonuçları.....	27
Şekil 4. 5. RN-ZnO nanopartiküllerin X-ışını kırınım deseni.....	28
Şekil 4. 6. RN@ZnO nanopartiküllerinin TGA grafiği	29
Şekil 4. 7. RN-ZnO nanopartiküllerin DLS parçacık boyut analizi.....	30
Şekil 4. 8. Biyosentezlenen RN@ZnO nanopartiküllerin zeta potansiyeli analizi.....	31
Şekil 4. 9. RC@ZnONPs'in elektrokimyasal performansı.....	33
Şekil 4. 10. RC@ZnONPs tabanlı süperkapasitörün elektrokimyasal performansı.....	35
Şekil 4. 11. RC@ZnONPs tabanlı süperkapasitörün 1 M H ₂ SO ₄ ortamında 5000 çevrim boyunca elde edilen Coulombik verimlilik verileri.....	36
Şekil 4. 12. RN@ZnONPs süperkapasitörüne ait güç ve enerji yoğunluklarının Ragone grafiği eğrisi.....	38
Şekil 4. 13. Farklı elektrolit ortamlarında RN@ZnONPs tabanlı süperkapasitörün elektrokimyasal empedans analizi.....	40

SİMGELER VE KISALTMALAR

RN: *Ribes Nigrum L.*

ZnONP: Çinko oksit nanopartikül

CV: Döngülü voltammetri

EIS: Elektrokimyasal impedans spektroskopisi

GCD: Galvanostatik şarj-deşarj

XRD: X-ışını kırınımı difraksiyonu

SEM: Taramalı elektron mikroskobu

FTIR: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi

UV-Vis: UV-Görünür bölge spektroskopisi

EDX: Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi

DLS: Dinamik ışık saçılımı

TGA: Termogravimetrik analiz

1. GİRİŞ

Modern nanoteknoloji araştırmaları, farklı sanayi ve endüstri sektörlerinde çığır açan gelişmelere olanak sağlaması ve umut verici sonuçlar ortaya koyması nedeniyle son yıllarda büyük önem kazanmıştır (Vu vd., 2022). Hızla ilerleyen bu alan, özellikle enerji, biyoteknoloji ve biyomedikal bilimlerinde yaşam kalitesi üzerinde derin etkiler yaratmaktadır. Nanoteknoloji; süperkapasitörler, enerji depolama sistemleri, optik ve tıbbi cihazlar, araç şarj üniteleri, güneş pilleri, biyomedikal uygulamalar, ilaç taşıma sistemleri, gıda ve kozmetik ürünleri, tekstil endüstrisi ve boya teknolojileri gibi pek çok alanda yenilikçi çözümler sunmaktadır (Gebre, 2023)

Bitkisel temelli kaynaklardan sentezlenen nanopartiküller, biyomedikal bilimlerden katalize, elektronik cihazlardan enerji teknolojilerine, gıda işleme ve su arıtma sistemlerinden sensör teknolojilerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu durum, nanomalzemelerin çok yönlülüğünü, etkinliğini ve çevresel uyarlabilirliğini açıkça ortaya koymaktadır (Sekoai vd., 2019). Günümüzde nanokabuk, nanoçubuk, nanoiğne, nanoküre, nanoküp ve nanoplaka gibi farklı morfolojilere sahip nanopartiküller başarıyla sentezlenebilmekte ve belirli fiziksel–kimyasal özellikleri doğrultusunda çeşitli uygulamalarda değerlendirilmektedir.

Nanopartiküllerin biyosentezinde doğadan ve doğal moleküllerden yararlanmak; basitlik, düşük maliyet, kararlı yapı, çevre dostu karakter ve enerji verimliliği gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Literatürde, nanopartiküller genellikle iki temel yaklaşım kullanılarak tasarlanır: “yukarıdan aşağıya” ve “aşağıdan yukarıya” yöntemleri. Yukarıdan aşağıya yaklaşım, büyük hacimli malzemelerin nanoparçacıklara ayrıştırılmasını içerirken; aşağıdan yukarıya yaklaşım, atom veya iyonların birleşerek nanopartikül yapısını oluşturmaya esasına dayanmaktadır (Nayak vd., 2021).

Enerji, insan medeniyetinin gelişiminde her dönemde temel bir unsur olmuştur. Artan enerji talebi, teknolojik ilerlemelerin hızlanmasına yol açarken; aynı zamanda alternatif, uygulanabilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına duyulan gereksinimi de artırmaktadır (J. Zhang vd., 2025). Günümüzde karşı karşıya kalınan enerji ve çevre krizleri, bir yandan fosil yakıtların tükenmesi, diğer yandan da bu kaynakların kullanımına bağlı olarak artan çevresel kirlilik nedeniyle küresel bir tehdit

oluşturmaktadır. Fosil yakıtların sınırlı arzı ve yanma süreçleri sonucunda ortaya çıkan zararlı emisyonlar, hem çevre hem de insan sağlığı açısından ciddi riskler yaratmaktadır (Hussain vd., 2023; Y. Wang vd., 2021)

Modern dünyada enerji, akıllı cihazlardan elektrikli araçlara, sanayiden ev sistemlerine kadar her alanda vazgeçilmez bir gereksinimdir. Ancak mevcut enerji kaynakları, çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik açısından ciddi sorunlar barındırmaktadır (Kaushik vd., 2025). Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan sera gazları, iklim değişikliğine ve hava kirliliğine katkıda bulunmakta; nükleer enerji ise atık yönetimi ve güvenlik riskleri nedeniyle sınırlı kabul görmektedir. Bu nedenle daha temiz, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelim kaçınılmaz hale gelmiştir (Sah vd., 2025).

Güneş, rüzgar ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynakları, çevreye minimum zarar vermeleri ve tükenmez nitelikleriyle dikkat çekmektedir. Ancak bu kaynakların doğası gereği kesintili enerji üretimi, enerji arz-talep dengesinde sorunlara yol açmaktadır (Reece vd., 2020; Salem Alsaiani vd., 2023). Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekliliğini sağlayabilmek için yüksek verimli ve güvenilir enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Gao ve Wang, 2024; Gopalakrishnan ve Badhulika, 2020).

Enerji depolama teknolojilerinin geliştirilmesinde çevre dostu, yenilenebilir ve sürdürülebilir yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır (Meena vd., 2024). Yeşil kimya ilkeleri, zararlı kimyasal kullanımını azaltarak ve enerji açısından verimli süreçleri teşvik ederek bu alanda önemli katkılar sağlamaktadır. Bu kapsamda, nanomalzemelerin yeşil sentezi, düşük çevresel etki, maliyet etkinliği ve yenilenebilir kaynakların kullanımı gibi avantajları nedeniyle giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bitki özütü destekli sentez yöntemleri, içerdikleri polifenoller, flavonoidler ve polisakkaritler gibi biyoaktif bileşikler sayesinde nanopartikül oluşumunu kolaylaştırmakta ve elde edilen partiküllerin kararlılığını artırmaktadır (Cai vd., 2024).

Günümüzde artan küresel enerji talebi ve fosil yakıt rezervlerinin tükenmesi, enerji üretiminde yenilenebilir alternatiflerin kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Bununla birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının doğasındaki süreksizlik, enerji üretimi ile tüketimi arasındaki boşluğun kapatılabilmesi için yüksek performanslı enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesini gerektirmektedir (Sah vd., 2025). Bu bağlamda, piller ve süperkapasitörler sürdürülebilir enerji teknolojilerinde temel enerji depolama çözümleri olarak ön plana çıkmaktadır.

Süperkapasitörler, uzun çevrim ömrü, yüksek güç yoğunluğu ve hızlı şarj-deşarj yetenekleri sayesinde enerji depolama sistemlerinde önemli bir yere sahiptir(Xu vd., 2021). Tipik bir pilin enerji yoğunluğu yaklaşık $180 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ iken, süperkapasitörlerde bu değer yaklaşık $10 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ düzeyindedir. Ancak süperkapasitörler, çok daha yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj olanağı ve uzun çevrim kararlılığı sayesinde birçok uygulamada avantaj sağlamaktadır (Jiang vd., 2024; Levent ve Saka, 2025b; Liu vd., 2025). Süperkapasitörlerde enerji depolama, elektrot ve elektrolit arasındaki arayüzde elektriksel çift tabaka oluşumu veya yüzeydeki faradaik reaksiyonlar yoluyla gerçekleşmektedir. Pillerin aksine, bu mekanizma çok daha hızlı şarj vedeşarj süreçlerine olanak tanır (Li vd., 2023; Zeng vd., 2024).

Süperkapasitörlerin enerji depolama performansı, büyük ölçüde kullanılan elektrot malzemesinin özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, yüksek özgül kapasiteli, çevre dostu ve düşük maliyetli elektrot malzemelerinin geliştirilmesi, süperkapasitör teknolojisinin ilerlemesi açısından kritik bir öneme sahiptir (Oyelade vd., 2025) (Oyélade et al., 2025). Metal oksitler, yüksek iletkenlik, kimyasal kararlılık ve geniş yüzey alanı gibi özellikleri sayesinde enerji depolama sistemlerinde aktif malzeme olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Bu bağlamda, yeşil sentez yöntemleriyle elde edilen bitki bazlı metal oksit nanopartikülleri, sürdürülebilir süperkapasitör teknolojilerinin geliştirilmesi için çevre dostu ve yenilenebilir bir alternatif sunmaktadır. Özellikle çinko oksit (ZnO) nanopartikülleri, yüksek kimyasal kararlılıkları, uygun bant aralığı ve üstün elektrokimyasal özellikleri sayesinde enerji depolama uygulamaları açısından oldukça dikkat çekicidir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, *Ribes Nigrum L.* (Siyah Frenk Üzümü, RN) meyve özütü kullanılarak ZnO nanopartiküllerinin yeşil sentezi gerçekleştirilmiş; sentezlenen nanopartiküller kapsamlı bir şekilde karakterize edilmiş ve enerji depolama performansları değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, bitki özütü destekli ZnO nanopartiküllerinin çevre dostu üretimini sağlayarak, bu materyalin süperkapasitör elektrot malzemesi olarak işlevliğini ortaya koymaktır. Ayrıca bu çalışma, atık bitkisel materyallerin değerlendirilmesi yoluyla yüksek performanslı, sürdürülebilir ve ekonomik enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesine yönelik gelecekteki araştırmalara katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Yapısal, morfolojik ve elektrokimyasal karakterizasyon yöntemlerinden elde edilen veriler bütüncül olarak değerlendirilmiş; böylece elektrot malzemesinin

süperkapasitör performansını belirleyen temel parametrelerin anlaşılması amaçlanmıştır. X-ışını kırınımı difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), Termogravimetrik analiz (TGA), Dinamik ışık saçılımı (DLS), Zeta potansiyel analizi ve UV-Vis. teknikleri aracılığıyla materyalin yüzey alanı, kristal yapısı, morfolojisi ve kimyasal bileşimi detaylı biçimde incelenmiştir. Bu yapısal özelliklerin elektrokimyasal davranış üzerindeki etkileri ise dönüşümlü voltammetry (CV), galvanostatik şarj-deşarj (GCD) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) elektrokimyasal analizleriyle desteklenmiştir. Böylece, malzemenin iyon taşınımı, yük depolama kapasitesi ve elektriksel iletkenlik gibi performans belirleyici özellikleri nicel olarak ortaya konulmuştur.

Bu çok yönlü yaklaşım, süperkapasitör elektrotlarının tasarımında malzeme yapısı–performans ilişkisini açık biçimde ortaya koymakta ve yüksek enerji yoğunluğu, yüksek güç yoğunluğu ile uzun döngü ömrüne sahip sistemlerin geliştirilmesine bilimsel temel oluşturmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Artan enerji gereksinimi, yüksek performanslı enerji depolama sistemlerine olan ilgiyi artırmıştır. Bu bağlamda süper kapasitörler, yüksek güç yoğunluğu ve uzun çevrim ömrü gibi avantajlarıyla dikkat çekmektedir. Ancak cihaz performansının iyileştirilmesi, büyük ölçüde elektrot malzemelerinin yapısal ve elektrokimyasal özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle literatürde, yüksek iletkenliğe ve geniş yüzey alanına sahip yenilikçi elektrot malzemelerinin tasarımı üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Dolayısıyla bu bölümde kısa bir literatür derlemesi yapılacaktır.

2.1 Süperkapasitörlerin temel yapısı ve elektrot malzemeleri

Kapasitörler, elektrik yükünü depolayabilen ve iki iletken plaka arasında bir yalıtkan tabaka (dielektrik) içeren temel enerji depolama elemanlarıdır. Bir kapasitör elektrik devresine bağlandığında, plakalar arasında bir elektrik alanı oluşur ve enerji bu alan içerisinde depolanır. Süperkapasitörler de benzer prensipte çalışmakla birlikte, enerji depolama mekanizmaları ve kullanılan ileri düzey malzemeler sayesinde çok daha yüksek kapasitans değerlerine ulaşabilen gelişmiş sistemlerdir(Ratha ve Samantara, 2018).

Süperkapasitörler genel olarak üç ana sınıfa ayrılır:

- (i) Elektrokimyasal çift tabaka süperkapasitörleri (EDLC),
- (ii) Psödokapasitörler ve
- (iii) Hibrit süperkapasitörler.

Bu sistemlerin temel özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

1. Elektrokimyasal çift tabaka süperkapasitörleri: Bu tür süperkapasitörlerde enerji depolama, elektrot/elektrolit ara yüzeyinde iyonların elektrostatik olarak birikmesiyle gerçekleşir. Yük depolama tamamen fiziksel bir süreç olduğundan, kimyasal reaksiyon içermez ve bu sayede oldukça uzun çevrim ömrüne sahiptir. EDLC’lerde genellikle yüksek yüzey alanına sahip karbon bazlı malzemeler (aktif karbon, grafen, indirgenmiş grafen oksit, karbon nanotüp, karbon soğanları vb.) elektrot olarak kullanılır. Bu sistemler yüksek güç yoğunluğuna sahip olmalarına karşın, enerji yoğunlukları görece düşüktür.

2. Psödokapasitörler: Bu sistemlerde enerji depolama, elektrot yüzeyinde veya yakınında gerçekleşen hızlı ve geri dönüşümlü redoks reaksiyonları yoluyla sağlanır. Bu tür süperkapasitörlerde metal oksitler (örneğin RuO_2 , MnO_2), sülfidler, selenidler, nitridler, iletken polimerler (örneğin polipirrol, polianilin) veya bu malzemelerin karbon kompozitleri aktif elektrot olarak kullanılabilir. EDLC'lere kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu sunarlar; ancak hibrit sistemlerle karşılaştırıldığında enerji kapasiteleri sınırlıdır (Levent ve Saka, 2025b).

3. Hibrit Süperkapasitörler: Bu özellikteki süperkapasitörler, 1990'lı yılların sonunda geliştirilmiş olup, EDLC tipi (yüksek güç sağlayan) ve psödokapasitif (yüksek enerji sağlayan) elektrotların tek bir hücrede birleştirilmesiyle oluşturulan sistemlerdir. Bu yapı, hem elektrostatik yük birikimini hem de hızlı redoks reaksiyonlarını kullanarak çalışır. Hibrit süperkapasitörler, daha geniş potansiyel aralıklarında çalışabildiklerinden geleneksel EDLC'lere kıyasla 2–3 kat daha yüksek enerji yoğunluğu sağlayabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde enerji depolama uygulamalarında güç ve enerji dengesi açısından önemli avantajlar sunarlar. Kullanılan elektrot malzemeleri, elektrolit türü ve sistem tasarımı, süperkapasitörlerin performans parametrelerini belirleyen temel unsurlardır (Levent ve Saka, 2025b).

Süperkapasitörlerin enerji depolama performansı, doğrudan elektrot malzemelerinin morfolojik, kimyasal ve elektronik özellikleriyle ilişkilidir. Literatürde elektrot malzemeleri genellikle üç temel grupta sınıflandırılmaktadır: karbon bazlı malzemeler, iletken polimerler ve metal oksit nanomalzemeler. Bu üç malzeme sınıfı, farklı mekanizmalar aracılığıyla kapasitif veya psödokapasitif davranış sergileyerek enerji depolama kapasitesine katkı sunmaktadır.

Karbon Bazlı Malzemeler

Karbon nanotüpler, grafen, karbon nanofiberler ve biyokütle kökenli aktif karbonlar gibi karbon bazlı malzemeler, yüksek özgül yüzey alanı, ayarlanabilir gözenek boyutu dağılımı ve üstün elektriksel iletkenlik özellikleri sayesinde EDLC'de yaygın olarak kullanılmaktadır (G. Zhang vd., 2018). Bu malzemeler, hızlı yük–deşarj süreçleri ve uzun çevrim ömürleriyle öne çıkarken; gözenekli yapıları, iyon taşınımını kolaylaştırarak yüksek güç yoğunluğu sağlar. Ancak, karbon malzemeler genellikle sınırlı enerji yoğunluğu ve düşük özgül kapasitans değerleri nedeniyle toplam enerji depolama kapasitesinde istenen düzeye ulaşamamaktadır. Buna ek olarak, geleneksel üretim süreçlerinde kullanılan yüksek sıcaklık, kimyasal aktivasyon reaktifleri ve karmaşık işlem

adımları, maliyeti artırarak karbon bazlı elektrotların geniş ölçekli ticari uygulamalarda kullanımını sınırlandırmaktadır (Yang vd., 2018).

Bu nedenlerle, son yıllarda araştırmalar biyokütle temelli aktif karbonlar üzerine yoğunlaşmıştır. Biyokütle kökenli karbonlar; yenilenebilir, düşük maliyetli ve çevre dostu olmaları sayesinde sürdürülebilir enerji depolama teknolojilerinde önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Doğal biyokütlelerin heterojen yapısı, aktivasyon sonrası geniş yüzey alanı ve çok düzeyli gözenek sistemleri oluşturarak iyon taşınım kinetiğini iyileştirmekte, böylece elektrotun elektrokimyasal performansını artırmaktadır.

İletken Polimerler

Polianilin, politiyofen ve polipirol gibi iletken polimerler, psödokapasitif davranış gösteren ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerdir. Esnek yapıları sayesinde mekanik deformasyonlara dayanıklı olmaları, ince film veya kompozit elektrotlarda kullanılmalarını kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte, iletken polimerlerin elektrokimyasal stabilitelerinin düşük olması, uzun çevrim ömürlü süperkapasitör uygulamalarında sınırlayıcı bir faktör oluşturmaktadır (Zhu vd., 2023).

Metal Oksit Nanomalzemeler

Süperkapasitörlerin enerji yoğunluğunu artırmak amacıyla, son yıllarda metal oksit nanopartiküllerinin çevre dostu ve düşük maliyetli sentez yöntemleri üzerine yoğun araştırmalar yürütülmektedir. En yaygın çalışılan metal oksitler arasında RuO_2 , ZnO , CuO , TiO_2 , MnO_2 ve NiO yer almaktadır. Bu malzemeler 100–2000 F/g arasında değişen özgül kapasitans değerleri sunarak karbon bazlı malzemelere kıyasla çok daha yüksek enerji yoğunluğu sağlamaktadır (Xiong vd., 2020). Ayrıca, iletken polimerlere göre daha yüksek kimyasal stabiliteye sahiptirler. Metal oksitlerin değişken değerlik durumları ve eşleşmemiş d-orbitalleri, oksijen indirgeme/oksidasyon reaksiyonlarını kolaylaştırarak elektrokimyasal süreçlerin verimliliğini artırmaktadır (Javed, Najam, vd., 2023).

Bununla birlikte, bu malzemeler düşük içsel iletkenlik, sınırlı iyon difüzyonu ve düşük yüzey alanı gibi nedenlerle teorik kapasitans değerlerine tam olarak ulaşamamaktadır (Javed, Mateen, vd., 2023). Bu sorunların aşılması için araştırmacılar karbon bazlı malzemelerle kompozit oluşturma veya heteroatom katkılama gibi stratejiler geliştirmektedirler.

ZnO Nanomalzemeleri

ZnO nanopartikülleri, hekzagonal wurtzit kristal yapısına sahip, geniş bant aralıklı (3.37 eV) yarı iletken oksitlerdir (Liang vd., 2021). Yüksek yüzey alanı/hacim oranı, iyon değişim kapasitesi, kimyasal kararlılık ve iyi elektronik iletkenlik özellikleri, ZnO'yu

enerji depolama sistemleri için son derece uygun bir malzeme haline getirmektedir. Literatürde ZnO, genellikle hidrotermal, sol-jel, birlikte çöktürme veya elektrokaplama gibi yöntemlerle sentezlendiği rapor edilmiştir(Gómez Torres vd., 2023). Ancak bu yöntemler yüksek sıcaklık ve enerji gereksinimi, toksik reaktif kullanımı ve çevresel etkiler nedeniyle sürdürülebilirlik açısından dezavantajlıdır(Akintelu vd., 2020). ZnO nanoyapıları, özellikle karbon veya biyokütle temelli kompozitlerde kullanıldığında, elektron taşınımını artırarak süperkapasitör performansını iyileştirir. Bu özellikleri, ZnO'yu yalnızca enerji depolama değil, aynı zamanda sensör, fotokataliz, su arıtımı ve biyomedikal uygulamalarda da stratejik bir malzeme konumuna getirmiştir(Akintelu vd., 2020).

Biyokütle Temelli Kompozit Elektrotlar

Günümüzde enerji depolama sistemlerinde çevresel sürdürülebilirliğin önem kazanmasıyla birlikte, biyokütle kökenli aktif karbon ve kompozit malzemeler, süperkapasitör elektrotları için en dikkat çekici araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. Bu malzemeler, yenilenebilir kaynaklardan elde edilmeleri, düşük maliyetli olmaları ve kimyasal aktivasyon sonrası yüksek yüzey alanı sunmaları sayesinde karbon bazlı geleneksel elektrotlara çevre dostu bir alternatif oluşturmaktadır.

Son yıllarda yapılan çeşitli çalışmalar, biyokütle kaynaklı aktif karbonların heteroatom (N, S, P, F, I) ve metal oksit (ZnO, CuO, NiO) katkılamalarıyla modifiye edilmesinin elektrokimyasal performansı belirgin şekilde artırdığına yönelik çalışmaların yapıldığı tespit edilmiştir. **Örneğin:**

Ceviz kabuğu kökenli aktif karbonun NiO ve N,P katkılarıyla modifikasyonu sonucu geliştirilen kompozit elektrotun, 2380 W/kg güç yoğunluğu ve 6.02 Wh/kg enerji yoğunluğu sergilediği bildirilmiştir(Levent ve Saka, 2025b).

Chenopodium botrys biyokütlesinden elde edilen aktif karbonlarda, hidrotermal ön işlemin oksijenli fonksiyonel grupların oluşumunu artırarak 441 F/g özgül kapasitansa ulaşılmasını sağladığı belirtilmiştir(Ekinci vd., 2025).

Mikroalg biyokütlesinden sentezlenen S ve I katkılı karbonlarda 208.95 F/g kapasitans ve %89.72 çevrim kararlılığı elde edilmiştir(Levent ve Saka, 2025a).

Nar kabuğu kaynaklı ZnO@N-doplu aktif karbonlar 265.2 F/g özgül kapasitans ve %86 çevrim korunumuyla yüksek stabilite göstermiştir(Saka ve Levent, 2024a).

Grafitik karbon nitrür (g-C₃N₄) sistemlerinde flor katkısı, kapasitansı 39.75 F/g'den 305.72 F/g'ye yükseltmiştir(Saka ve Levent, 2024b).

Antep fıstığı kabuğu kökenli CuO@S-doplu karbonlar 397.16 F/g kapasitans ve %92.64 kararlılık göstermiştir(Zou vd., 2018).

Muz kabuğu kaynaklı S ve ZnO modifiye karbonlarda ise ZnO katkısının gözenek yapısını optimize ederek 224.15 F/g özgül kapasitans sağladığı rapor edilmiştir(Levent ve Saka, 2024a).

Bu bulgular, heteroatom ve metal oksit katkılarının sinerjik etkisiyle biyokütle kökenli karbonların yüzey fonksiyonelliğini ve iyon transfer kinetiğini geliştirdiğini göstermektedir. Sonuç olarak, bu tür kompozit elektrotlar yalnızca çevre dostu ve sürdürülebilir değil, aynı zamanda yüksek kapasitans, uzun çevrim ömrü ve düşük üretim maliyeti gibi üstün özellikleriyle ticari süperkapasitör teknolojileri için güçlü adaylar olarak değerlendirilmektedir.

2.2 Yeşil sentez tekniği kullanılarak sentezlenen elektrot malzemesi

Bölüm 2.1’de ayrıntılı olarak tartışıldığı üzere, süperkapasitör uygulamalarında yaygın olarak kullanılan karbon bazlı malzemeler, iletken polimerler ve metal oksit nanomalzemeler, yüksek performanslarına karşın üretim süreçlerinde sıklıkla toksik kimyasallar, yüksek sıcaklık ve basınç koşulları ile karmaşık ve uzun süren deneysel protokoller gerektirmektedir. Bu durum, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik uygulanabilirlik açısından önemli engeller oluşturmakta ve enerji depolama teknolojilerinde çevre dostu alternatif arayışlarını gündeme getirmektedir.

Bu kapsamda, son yıllarda biyolojik ya da yeşil sentez yaklaşımları giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu yöntemler, bitki özleri, mikroorganizmalar (örneğin bakteriler, mantarlar ve algler) veya biyomoleküller (proteinler, enzimler, polisakkaritler vb.) gibi yenilenebilir biyolojik kaynakları kullanarak nanopartikül üretimini mümkün kılmaktadır(Jeevanandam vd., 2022). Yeşil sentez yöntemleri, toksik reaktiflerin kullanımını en aza indirmesi, düşük enerji gereksinimi, tek adımlı işlem kolaylığı, çevre dostu yapısı ve yüksek verimliliği sayesinde metal oksit nanopartiküllerinin üretiminde umut vadeden bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Meena vd., 2024).

Biyolojik bileşenlerde doğal olarak bulunan fenolik bileşikler, flavonoidler, terpenoidler, alkaloidler ve proteinler, hem indirgeme hem de kaplama ajanı olarak işlev görür. Bu moleküller, metal iyonlarının kontrollü indirgenmesini sağlayarak sentezlenen nanopartiküllerin boyut, morfoloji ve kristal kararlılığının optimize edilmesine katkı sağlar. Dolayısıyla yeşil sentez, yalnızca çevre dostu bir yaklaşım olmakla kalmayıp, aynı

zamanda fonksiyonel ve performans açısından geliştirilebilir elektrot malzemelerinin tasarımında yenilikçi bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte, metal oksit nanopartiküllerinin biyolojik sentezinde mikroorganizmaların kullanımı bazı teknolojik ve ekonomik sınırlamalara sahiptir. Mikroorganizmaların kültürlenmesi için özel besi ortamları, steril laboratuvar koşulları ve hassas sıcaklık–pH kontrol sistemleri gerekmekte, bu da yüksek üretim maliyetlerine yol açmaktadır. Ayrıca, mikroorganizmalar genellikle yavaş çoğalmakta ve bitkiler kadar yüksek biyokütle verimi sağlayamamaktadır. Bunun yanı sıra, mikroorganizma temelli sentezlerde elde edilen nanopartiküller, boyut, morfoloji ve kristal yapı açısından yüksek değişkenlik göstermekte ve bu durum üretim sürecinin tekrarlanabilirliğini ve endüstriyel ölçeklenebilirliğini sınırlamaktadır (D. Kumar, H. Shukla, 2022).

Bu nedenlerle, son yıllarda bitki aracılı yeşil sentez yöntemleri metal oksit nanopartiküllerinin üretiminde ön plana çıkmıştır. Bitki özütleri, içerdikleri fitokimyasal bileşikler (örneğin flavonoidler, fenolik asitler, terpenoidler ve proteinler) sayesinde hem indirgeme ajanı hem de dengeleyici/stabilize edici ajan olarak görev yapmaktadır. Bu bileşikler, metal iyonlarının indirgenmesini kolaylaştırarak kontrollü partikül boyutu ve uygun morfolojik özellikler elde edilmesini sağlar. Ayrıca, bitki özütlerindeki karbon ve oksijen bazlı fonksiyonel gruplar, nanopartikül yüzeyinde biyo-konjugasyon etkileşimlerini artırarak elektrot yüzeyinde aktif bölge yoğunluğunun artmasına katkıda bulunur. Bu etki, süperkapasitörlerde elektrot–elektrolit etkileşimini güçlendirir ve sonuç olarak kapasitif davranışı iyileştirir(Shaheen vd., 2021).

Bitki temelli yeşil sentez yöntemleri yalnızca çevre dostu olmalarıyla değil, aynı zamanda düşük enerji tüketimi, basit işlem basamakları, ekonomik uygulanabilirlik ve ölçeklenebilir üretim potansiyeli ile de öne çıkmaktadır. Ayrıca, sentez süreçlerinde genellikle tarımsal atıkların veya yenilenebilir biyokütlelerin değerlendirilmesi, bu yöntemi çevresel ve ekonomik açıdan tamamen sürdürülebilir hale getirmektedir. Üretim sonrası oluşan yan ürünlerin düşük toksisiteye sahip olması da çevre üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirmektedir.

Sonuç olarak, bitki aracılı yeşil sentez yaklaşımı, çevre dostu yapısı, düşük maliyeti ve yüksek verimliliği sayesinde sürdürülebilir nanopartikül üretiminde önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu tez çalışmasında da, enerji depolama uygulamalarında kullanılmak üzere RN bitki özütü aracılığıyla ZnO nanopartiküllerinin yeşil sentezi gerçekleştirilmiş ve bu yöntemin elektrot malzemesi üretiminde uygulanabilirliği araştırılmıştır.

3. YÖNTEM

Bu bölümde, RN özütü kullanılarak yeşil sentez yöntemiyle elde edilen RN@ZnONPs temelli elektrot malzemesinin yapısal, morfolojik ve elektrokimyasal karakterizasyonunda kullanılan yöntemler ile enerji depolama performansının incelenmesinde uygulanan analiz tekniklerine ilişkin ayrıntılı bilgilere yer verilmiştir.

3.1. Elektrokimyasal analiz yöntemleri

Tezin bu bölümünde, RN@ZnONPs temelli elektrot malzemesinin enerji depolama davranışının incelenmesinde kullanılan elektrokimyasal analiz yöntemleri hakkında temel bilgiler verilmiştir. Elektrokimyasal ölçümlerde CV, GCD ve EIS teknikleri kullanılarak elektrotun kapasitif özellikleri, iletkenlik davranışı ve elektrokimyasal kararlılığı değerlendirilmiştir. Öncelikle bu analiz yöntemlerinde kullanılan destekleyici elektrolitler hakkında kısa bir bilgi verilecektir. Elektrokimyasal analizlerde kullanılan destekleyici elektrolitler, ölçüm ortamının iletkenliğini sağladıkları ve iyon taşınımını kolaylaştırdıkları için tüm bu tekniklerin (CV, GCD, EIS) temel bileşenidir.

Elektrokimyasal analizlerde kullanılan destekleyici elektrolitler, sistemin toplam iletkenliğini artırarak çözelti direncini azaltan ve iyon taşınımını kolaylaştıran temel bileşenlerdir. Ayrıca, elektrot yüzeyinde gerçekleşen redoks süreçlerinin kararlılığını ve tekrarlanabilirliğini büyük ölçüde etkileyebilir. Destekleyici elektrolit seçimi, hem kullanılan elektrot malzemesinin kimyasal özelliklerine hem de yürütülen elektrokimyasal tekniğin doğasına bağlı olarak seçilir. Genel olarak bu elektrolitler sulu ve susuz (organik) olmak üzere iki ana sınıfta incelenir(Bard ve Faulkner, 2022)

a) Sulu destekleyici elektrolitler

Sulu elektrolit sistemleri, iyonik iletkenliklerinin yüksek olması, hazırlanma kolaylığı ve çevre dostu olmaları nedeniyle süperkapasitör çalışmalarında en yaygın kullanılan ortamlardır(Haque vd., 2018; Saini ve Chand, 2022). Sulu elektrolitlerde iyon taşınımını su molekülleri tarafından kolaylaştırılır ve düşük iç direnç değerleri elde edilir.

Sulu elektrolitler, genellikle kullanılan iyon türüne göre asidik, nötral ve bazik olarak üç gruba ayrılır:

Asidik ortamlar: Genellikle H_2SO_4 , HCl veya HNO_3 çözeltileri tercih edilir. Bu ortamlarda proton taşınımı oldukça hızlı olduğundan yüksek iletkenlik sağlanır. Özellikle karbon temelli elektrotların kapasitif davranışlarının incelenmesinde yaygındır.

Nötral ortamlar: Na_2SO_4 , K_2SO_4 , KCl veya $NaNO_3$ gibi tuz çözeltileri kullanılır. Nötral ortamlar elektrot malzemesinin yüzey kararlılığını korur ve uzun süreli döngülerde bozulmayı azaltır.

Bazik ortamlar: KOH ve $NaOH$ çözeltileri en yaygın kullanılan bazik elektrolitlerdir. Bu tür ortamlar, özellikle metal oksit veya metal hidroksit esaslı elektrotların redoks aktivitelerini desteklediği için pseudokapasitif davranış gösteren süperkapasitörlerde tercih edilir.

b) Susuz (organik) destekleyici elektrolitler

Susuz veya organik elektrolit sistemleri, daha geniş potansiyel çalışma aralığı sunmaları nedeniyle yüksek enerji yoğunluğu gerektiren süperkapasitör uygulamalarında tercih edilir. Bu sistemlerde çözücü olarak genellikle asetonitril, propilen karbonat veya etilen karbonat gibi organik çözücüler kullanılır. Destekleyici elektrolit olarak ise çözünürlükleri yüksek ve iyon taşınımı kararlı tuzlar tercih edilir (Bhide vd., 2014). En yaygın kullanılanlar: Tetraetilamonyum tetrafloroborat, Tetrabutylamonyum heksaflorofosfat, Lityum hekzaflorofosfat ve Lityum tetrafloroborat.

3.1.1. Döngülü voltammetri

CV tekniği çalışma elektrotu yüzeyinde gerçekleşen redoks süreçlerinin potansiyel farkına bağlı olarak incelenmesini sağlayan temel bir elektrokimyasal tekniktir. Bu yöntemde, belirli bir potansiyel aralığında çalışma elektrotu üzerine doğrusal olarak değişen potansiyel uygulanırken, oluşan akım sürekli olarak kaydedilir. Elde edilen akım-potansiyel eğrileri (voltamogramlar), sistemin oksidasyon ve indirgenme davranışları hakkında nitel ve nicel bilgiler sunar. CV tekniği; çalışma elektrotu yüzeyinde gerçekleşen elektron transfer mekanizmalarının, redoks çiftlerinin tersinirliğini ve elektrot malzemesinin elektrokimyasal kararlılığının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (J. Wang, 2023).

Süperkapasitör çalışmalarında CV, elektrot malzemesinin kapasitif davranışını, enerji depolama mekanizmasını ve aktif yüzey özelliklerini belirlemek amacıyla

kullanılan en temel analiz yöntemlerinden biridir(Raza vd., 2018). CV eğrisinin şekli, sistemin enerji depolama tipine ilişkin önemli ipuçları verir(Ratha ve Samantara, 2018). Örneğin, dikdörtgene yakın bir voltamogram eğrisi, çift tabaka kapasitör davranışını; belirgin redoks piklerinin görülmesi ise pseudokapasitif özelliklerini göstermektedir.

Bu teknik sayesinde elektrot malzemesinin spesifik kapasitansı, redoks reversibilitesi, yük transfer kinetiği ve iletkenlik özellikleri hakkında bilgi edinilir(Pedro Aguiar dos Santos vd., 2023). Ayrıca tarama hızına bağlı olarak elde edilen veriler, iyon difüzyon mekanizması ve elektrot-elektrolit etkileşiminin doğası hakkında da önemli bilgiler vermektedir. Bu bilgilerden yola çıkarak süperkapasitör sistemlerinin performans değerlendirmesinde hem nitel hem de nicel analizler için kullanılmakta; elektrot malzemesinin enerji depolama kapasitesi ve elektrokimyasal kararlılığı hakkında diğer elektrokimyasal yöntemlere ön bilgi sunmaktadır.

3.1.2. Galvanostatik şarj-deşarj

GCD yöntemi, süperkapasitör temelli elektrot sistemlerinin enerji depolama performansını nicel olarak değerlendirmek için yaygın biçimde kullanılan temel bir elektrokimyasal analiz tekniğidir. Bu yöntemde, çalışma elektrot sistemi sabit bir akım altında şarj edilir ve ardından aynı akım yönünün tersine çevrilmesiyledeşarj edilir. Şarj vedeşarj süresince potansiyelde meydana gelen değişim kaydedilerek, elde edilen potansiyel-zaman eğrileri üzerinden elektrot malzemesinin kapasitif davranışı analiz edilir.

GCD eğrilerinin şekli, sistemin enerji depolama mekanizması hakkında önemli bilgiler sunar. İdeal çift tabaka kapasitörlerde potansiyel-zaman eğrileri lineer ve simetrik bir profil gösterirken, pseudokapasitifmalzemelerde redoks reaksiyonlarına bağlı olarak küçük sapmalar veya eğrilikler gözlenebilir(Ratha ve Samantara, 2018; Saini ve Chand, 2022). Bu eğrilerin doğrusal ve simetrik olması, elektrotun yüksek reversibiliteye ve iyi bir elektrokimyasal kararlılığa sahip olduğunu gösterir.

Süperkapasitörlerde GCD tekniği, elektrot malzemesinin spesifik kapasitansı, enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu ve çevrim kararlılığı gibi performans parametrelerinin hesaplanmasında temel veri kaynağıdır(Ratha ve Samantara, 2018). Ayrıca farklı akım yoğunluklarında gerçekleştirilen GCD ölçümleri, elektrot malzemesinin iyon iletkenliği ve yük transfer kinetiği hakkında bilgi sağlar(Raza vd., 2018). Akım yoğunluğu arttıkça

kapasitans değerindeki değişim, malzemenin yüksek akım koşullarındaki kararlılığını değerlendirmek açısından önemli bir göstergedir.

Bu teknik, CV ve EIS ile birlikte kullanıldığında, süperkapasitör sisteminin genel enerji depolama davranışını bütüncül bir şekilde ortaya koyar. Dolayısıyla GCD analizi, hem nicel performans değerlendirmesi hem de elektrot kararlılığı açısından enerji depolama deneylerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.1.3. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi

EIS, elektrot-elektrolit arayüzünde meydana gelen elektro-kimyasal süreçlerin frekans bağımlı davranışını incelemeye olanak tanıyan güçlü bir analiz tekniğidir. Bu yöntemde, sisteme geniş bir frekans aralığında düşük genlikli alternatif akım sinyali uygulanır ve buna karşılık elde edilen akım cevabı ölçülür. Potansiyel ve akım arasındaki faz farkı ve genlik oranı hesaplanarak sistemin toplam empedansı belirlenir. Elde edilen empedans verileri genellikle Nyquist ve Bode diyagramları şeklinde değerlendirilir(Ratha ve Samantara, 2018).

EIS tekniği, süperkapasitörlerin elektriksel iletkenliği, iyon difüzyon direnci, şarj transfer kinetiği ve eşdeğer seri direnç (ESR) gibi parametrelerinin anlaşılmasında kritik rol oynar. Nyquist diyagramında yüksek frekans bölgesinde gözlenen yarım daire, yük transfer direncine ve çift tabaka kapasitansına karşılık gelirken; düşük frekans bölgesinde yer alan eğimli doğrusal kısım, iyon difüzyonuna (Warburg empedansı) işaret eder. Bu bölgelerin analizi, elektrot malzemesinin iletkenlik özellikleri, gözenek yapısı ve iyon taşınımı hakkında ayrıntılı bilgi sağlar(Ratha ve Samantara, 2018; Raza vd., 2018; Saini ve Chand, 2022).

Süperkapasitörlerde EIS, özellikle iletkenlik kayıplarının ve iç direnç bileşenlerinin belirlenmesinde büyük önem taşır. ESR değeri ne kadar düşükse, elektrot malzemesinin enerji depolama sürecinde o kadar az kayıp yaşanır ve sistemin güç yoğunluğu o kadar yüksek olur. Ayrıca döngü öncesi ve sonrası elde edilen empedans verilerinin karşılaştırılması, elektrot malzemesinin uzun dönem elektrokimyasal kararlılığını değerlendirmede kullanılır.

Bu yönleriyle EIS, süperkapasitörlerin performans karakterizasyonunda tamamlayıcı bir analiz yöntemi olarak, CV ve GCD teknikleriyle birlikte değerlendirilir. Böylece hem kapasitif davranışın hem de iç direnç bileşenlerinin detaylı olarak anlaşılması mümkün olur.

3.2. Yapısal ve morfolojik analizler

Elektrot malzemelerinin yapısal, morfolojik ve yüzey özellikleri, süperkapasitörün enerji depolama kapasitesi, iyon taşınımı ve genel elektrokimyasal performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle, sentezlenen materyallerin fiziksel karakterizasyonu amacıyla BET yüzey alanı analizi, XRD, SEM, TEM, FTIR, Raman spektroskopisi ve X-ışını fotoelektron spektroskopisi gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır(Lakshmi ve Vedhanarayanan, 2023).

BET yüzey alanı ve gözeneklilik analizleri, elektrot malzemesinin spesifik yüzey alanını ve gözenek boyut dağılımını belirlemek için uygulanır. Yüksek yüzey alanı ve uygun gözenek yapısı, elektrolit iyonlarının aktif bölgelere daha kolay ulaşmasını sağlayarak spesifik kapasitans değerini artırır. Bu analizler genellikle azot adsorpsiyon–desorpsiyon izotermi üzerinden değerlendirilir ve Brunauer–Emmett–Teller (BET) yöntemiyle hesaplanır(Ekinci vd., 2025).

XRD analizi, malzemenin kristal faz yapısını, kristalit boyutunu ve kristalinlik derecesini belirlemek için kullanılır. Piklerin konumu ve şiddeti, malzemenin faz bileşimini ve kristal düzenini ortaya koyar. Geniş veya düşük şiddetli piklerin gözlenmesi, genellikle amorf yapıların varlığına işaret eder; bu durum süperkapasitörlerde iyon taşınımı açısından avantaj sağlayabilir.

SEM ve TEM görüntüleme teknikleri, elektrot yüzeyinin morfolojisini, partikül boyutunu ve gözenek yapısını incelemek için kullanılır. SEM görüntüleri, yüzey topografyası hakkında genel bilgi sunarken; TEM analizleri, malzemenin iç yapısı ve kristal örgüsü hakkında yüksek çözünürlüklü detaylar sağlar. Bu analizler, sentezlenen nanoyapıların homojen dağılımını, aglomerasyon eğilimini ve yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmeye yardımcı olur.

FTIR ve Raman spektroskopileri, materyalin kimyasal bileşimi ve fonksiyonel gruplarının belirlenmesi için kullanılmıştır. FTIR spektrumları, yüzeydeki hidroksil, karbonil, amin veya metal–oksijen bağlarını ortaya koyarken; Raman analizi, karbon temelli yapıların hibritleşme durumunu (sp^2/sp^3 oranı) ve yapısal düzenliliğini değerlendirmede etkilidir(Levent ve Saka, 2025b). XPS analizi ise malzemenin yüzey kimyasını, elementel bileşimini ve elementlerin oksidasyon durumlarını belirlemek için uygulanır. Bu yöntem, özellikle metal oksit veya heteroatom katkılı karbon malzemelerinde, aktif yüzey bölgelerinin kimyasal doğasını anlamak açısından son derece önemli bir tekniktir.

TGA, bir malzemenin ısıtma süreci boyunca kütle değişimini ölçerek termal kararlılığı ve bileşen içeriği hakkında bilgi veren bir tekniktir. Analiz sırasında örnek, kontrollü bir sıcaklık artışı altında inert (örneğin azot) veya oksitleyici (örneğin hava) atmosferde ısıtılır. Elde edilen kütle kaybı eğrileri, malzemedeki nem, organik kalıntılar ve bozunma sıcaklıkları gibi özelliklerin belirlenmesini sağlar.

DLS analizi, çözeltideki nanopartiküllerin hidrodinamik çapını ve boyut dağılımını belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu teknikte, partiküllerin Brownian hareketine bağlı olarak saçılan ışığın zamanla değişimi ölçülür ve bu verilerden parçacık boyutu hesaplanır. DLS yöntemi, sentezlenen nanopartiküllerin homojenliği ve dağılım kararlılığı hakkında hızlı ve güvenilir bilgi sağlar.

Zeta potansiyel analizi, kolloidal sistemlerdeki partiküllerin yüzey yükünü ve buna bağlı olarak elektrostatik kararlılığını belirlemek için kullanılan bir tekniktir. Yüksek zeta potansiyel değerleri (pozitif veya negatif), partiküller arası itmenin fazla olduğunu ve sistemin kararlı olduğunu gösterir. Bu analiz, özellikle nanopartikül süspansiyonlarının dispersiyon kararlılığının değerlendirilmesinde önemli bir parametredir.

Bu karakterizasyon yöntemlerinden elde edilen bulgular, elektrot malzemesinin yüzey alanı, gözeneklilik yapısı, kristal faz bileşimi ve yüzey kimyasal durumunun, süperkapasitörün enerji depolama performansı üzerindeki etkisini açıklamak amacıyla bütüncül olarak değerlendirilmektedir.

3.3. Kimyasallar

Bu tez çalışmasında grafit tozu, çinko nitrat, mineral yağ, karbon siyahı, potasyum hidroksit, sülfirik asit, sodyum sülfat, gibi reaktifler kullanılmıştır. Kullanılan bu reaktifler analitik saflıkta olup sigma-aldrich den temin edilmiştir.

3.4 *Ribes Nigrum L.* ile İlgili Genel Bilgiler

Ribes Nigrum L. (Siyah Frenk Üzümlü veya Kuş Üzümlü, RN), Plantae alemine, Magnoliopsida sınıfına, Saxifragaceae takımına ve Grossulariaceae familyasına ait çok yıllık bir çalı türüdür (“Assessment report on *Ribes nigrum L.*, folium”, 2025). *Ribes* cinsi, dünya genelinde yaklaşık 140–150 tür içeren geniş bir taksonomik gruptur.

Bitkinin taksonomik hiyerarşisi şu şekildedir:

- **Alem:** Plantae
- **Alt Alem:** Tracheobionta
- **Sınıf:** Magnoliopsida
- **Alt Sınıf:** Rosidae
- **Takım:** Rosales (bazı kaynaklarda Saxifragaceae takımı altında da sınıflandırılmaktadır)
- **Aile:** Grossulariaceae
- **Cins:** Ribes
- **Tür:** Ribes nigrum L.

Ribes nigrum, ticari açıdan önemli bir meyve türüdür. Küresel üretimin yaklaşık %85'i Avrupa'da yoğunlaşmış olup, Polonya önde gelen üretici ülke konumundadır("Global-BC-Production-2022-2024", 2025).

RN, yaprak döken, çok yıllık bir çalı formundadır ve halk arasında "Siyah Frenk Üzümlü" ya da "Kuş Üzümlü" olarak bilinir. Meyveler koyu mor-siyah renkte, karakteristik olarak hafif acımsı ve buruk tada sahiptir. Bu belirgin asitlik, yüksek sitrik asit içeriğinden kaynaklanmakta olup, mandelik asit gibi diğer organik asitler de meyvenin asidik profilinde katkıda bulunur(Ajay Sharma, Garima Bhardwaj, Jyoti Gaba, 2020).

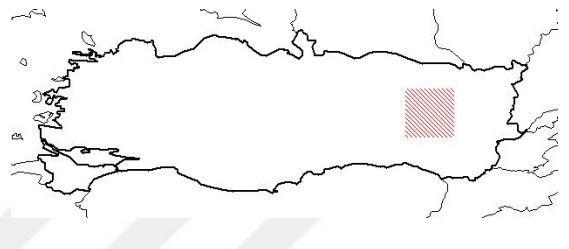
Bitkinin meyveleri, yaprakları, çiçekleri ve tohumlarından elde edilen yağlar dahil olmak üzere çeşitli kısımları farmakolojik, antioksidan ve antiinflamatuvar özellikleri nedeniyle tıbbi ve biyoteknolojik uygulamalarda değerlendirilmektedir(Lee ve Lee, 2019). Meyveler, özellikle antosiyanin ve polifenolik bileşikler açısından oldukça zengindir. Başlıca dört antosiyanin bileşiği; delfinidin 3-O-rutinosid, siyanidin 3-O-rutinosid, delfinidin 3-O-glukozid ve siyanidin 3-O-glukozid olarak tanımlanmıştır. Bu bileşikler, bitkiye karakteristik koyu rengini kazandırmakta ve güçlü antioksidan özelliklerinden sorumludur.

RN, nemli ve serin iklim koşullarında, iyi drene olmuş, organik maddece zengin topraklarda yetişir. Türkiye'de doğal yayılışı Doğu Anadolu Bölgesi ile sınırlıdır. Tür endemik değildir; genel dağılım alanı Orta ve Doğu Avrupa'yı kapsamaktadır. Yaklaşık 2000 m rakıma kadar yetiştirme özelliği gösterir.

RN meyveleri, içerdiği yüksek miktardaki fenolik bileşikler, flavonoidler ve antosiyaninler sayesinde metal oksit nanopartiküllerinin yeşil sentezinde indirgeme ve kaplama ajanı olarak değerlendirilebilmektedir. Bu biyokimyasal zenginlik, çevre dostu

sentez yöntemlerinin geliştirilmesine olanak tanıyarak biyotabanlı nanomalzeme üretiminde önemli bir potansiyel sunmaktadır.

RN bitkisi Doğu Anadolu Bölgesinin Muş ilinden toplandı Şekil 3.1. Toplanan RN bitkisi Batman Üniversitesi Gıda teknolojisi laboratuvarında'nda toz kalıntılarından arındırmak için önce çeşme suyuyla daha sonra birkaç kez distile su ile yıkanarak oda sıcaklığında laboratuvarında 10 gün boyunca kurumaya bırakıldı. Kurutulan RN bitkisi IKA M 20 Evrensel öğütücü ile toz haline getirildikten sonra çalışmalarda kullanıldı.

<i>Taksonun Türkiye'deki Dağılımı</i>	<i>İllere göre dağılım MUŞ</i>
	

Şekil 3.1. *Ribes Nigrum L.* (Kuş Özümü) Taksonun Dağılımı.

3.5 RN@ZnO nanopartiküllerinin yeşil sentezi

Bu çalışma kapsamında, indirgeyici ajan olarak RN bitkisinden elde edilen özüt kullanılarak ZnO nanopartiküllerinin yeşil sentezi gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada RN bitkisi gölgede kurutulmuş, ardından öğütülerek yaklaşık 100 g miktarında toz hâline getirilmiştir. Elde edilen toz örnek, 500 mL'lik erlene aktarılmış ve üzerine 400 mL deiyonize su ilave edilmiştir. Karışım, 90 °C sıcaklıkta ayarlanmış manyetik karıştırıcı üzerinde 2 saat boyunca ısıtılmıştır.

Isıtma işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen karışım oda sıcaklığına soğutulmuş ve Whatman No.1 filtre kâğıdı kullanılarak süzölmüştür. Bu işlemle reaksiyona girmemiş bitki kalıntıları uzaklaştırılarak, partikül içermeyen berrak bir özüt elde edilmiştir. Ardından süzgeç kâğıdından geçen çözelti 6000 rpm'de santrifüj edilerek kalan katı kısımlar ayrılmış ve süzöntü kısmı alınmıştır. Bu süpernatant, hem karakterizasyon çalışmalarında hem de RN@ZnO nanopartiküllerinin sentezinde kullanılmak üzere 4 °C sıcaklıkta, karanlık ortamda muhafaza edilmiştir.

İkinci aşamada ZnO nanopartiküllerinin sentezi için, $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ bileşiğinden 1 M'lik stok çözelti hazırlanmıştır. Bu stok çözeltiden alınan 50 mM'lik 500 mL çinko nitrat çözeltisi, temiz bir behere aktarılmıştır. Daha sonra, önceden hazırlanan RN bitkisi özütünden 400 mL miktarında çözeltinin damla damla ilavesiyle karışım sürekli

karıştırılmıştır. Yaklaşık 10 saatlik karıştırma sürecinin ardından, ortamın pH değeri 9.45 oluncaya kadar 2 M NaOH çözeltisi ilave edilmiştir.

Elde edilen karışım, 75 °C sıcaklıktaki su banyosunda 1 saat süreyle tutulmuş, ardından aynı sıcaklıkta ayarlanmış manyetik karıştırıcıda 4 saat boyunca karıştırılmaya devam edilmiştir. Süreç sonunda sarımsı kristal yapılı bir çökelti oluşumu gözlemlenmiştir. Çökelti oluşumunun ardından sistem oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış, daha sonra çözelti 4500 rpm’de 10 dakika santrifüj edilerek katı faz ayrılmıştır.

Santrifüj sonucunda elde edilen beyaz kristal çökelti, üzerinde bitki özütü kalıntısı kalmayacak şekilde distile su ile birkaç kez yıkanmış ve her yıkama sonrası yeniden santrifüj edilmiştir. Elde edilen saf çökelti, 110 °C’de etüvde kurutulmuş, ardından 700 °C sıcaklıktaki kül fırınında kalsine edilmiştir. Kalsinasyon işlemi sonrasında elde edilen katı ürün, havanda öğütülerek toz hâline getirilmiştir.

Sonuç olarak sentezlenen RN@ZnO nanopartikülleri, çeşitli karakterizasyon teknikleri (TGA, DLS, Zeta potansiyel, UV-Vis, FTIR, XRD, SEM vb.) ile incelenmiş; yapısal özellikleri, kararlılığı ve morfolojik nitelikleri değerlendirilmiştir. Sentezlenen nanopartiküller, daha sonraki elektrokimyasal ve enerji depolama çalışmaları için karanlık ve serin koşullarda saklanmıştır.

3.6 Elektrot malzemesinin hazırlanması

Sentezlenen RN@ZnONPs aktif faz olarak elektrot malzemesi içerisinde kullanılmıştır. Elektrotun elektriksel iletkenliğinin artırılması amacıyla yüksek iletkenliğe sahip grafit tozu, bağlayıcı özellik kazandırmak ve karışımın homojenliğini sağlamak için ise mineral yağ ilave edilmiştir. Bu üç bileşen, kütlece 7.5:0.5:2 oranında tartılarak hassas bir şekilde karıştırılmıştır(Saka ve Levent, 2024a; Saygılı vd., 2025). Karışım, camsı ve akışkanlığı düşük bir hamur kıvamına gelinceye kadar mekanik olarak işlenmiş; böylece macun benzeri bir kompozit yapı elde edilmiştir.

Hazırlanan elektrot hamuru, karbon pasta elektrot gövdesi (MF-2010, BASi) içerisine manuel olarak yerleştirilmiş ve homojen bir yüzey elde etmek için elektrot yüzeyi dikkatlice bastırılarak düzeltilmiştir. Bu işlem, elektrot yüzeyinde iyi yapışma, düzgün yüzey morfolojisi ve homojen malzeme dağılımı sağlayarak elektrokimyasal analizler için uygun bir yapı oluşturmuştur. Ayrıca bu yöntem, aktif malzemenin elektrot

yüzeyinde yüksek stabilite göstermesine ve elektrokimyasal tepkimelerde etkin şekilde rol almasına olanak tanımaktadır.

Bu yaklaşım, karbon pasta elektrotların modifikasyonuna yönelik literatürde yaygın olarak rapor edilen basit, düşük maliyetli ve yeniden üretilebilir bir yöntemle uyumludur. Böylece RN@ZnONPs ile modifiye edilen elektrot, elektrokimyasal performans testleri için güvenilir ve tekrarlanabilir bir yapı sergilemiştir.

3.7 Elektrokimyasal ölçümler

Bu çalışmada yeşil sentez tekniğinden yararlanarak tasarlanan elektrotların enerji depolama özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen tüm deneyler, AUTOLAB PGSTAT128N model potansiyostat/galvanostat sistemi kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler, BASi marka standart üç elektrotlu hücre düzeninde gerçekleştirilmiştir. Hücre sisteminde, platin tel (Pt; MF-1032, BASi) yardımcı elektrot olarak, Ag/AgCl (3 M KCl; MF-1063, BASi) ise referans elektrot olarak kullanılmıştır. Çalışma elektrodu olarak ise sentezlenen RN@ZnONPs tabanlı modifiye elektrot hazırlanarak deneysel düzenekte konumlandırılmıştır.

Elektrotun enerji depolama özellikleri için elektrokimyasal performansını farklı ortam koşullarında değerlendirebilmek amacıyla üç farklı elektrolit çözeltisi hazırlanmıştır:

Asidik ortam: 1 M H₂SO₄

Nötral ortam: 1 M Na₂SO₄

Bazik ortam: 1 M KOH

Elektrotun enerji depolama karakterizasyon çalışmaları üç temel elektrokimyasal teknik ile yürütülmüştür:

Döngülü Voltammetri: Elektrotun redoks davranışının ve kapasitif özelliklerinin incelenmesi için uygulanmıştır. CV deneyleri, elektrot yüzeyinde gerçekleşen elektron transfer süreçlerini ve aktif bölgelerin elektrokimyasal tepkisini gözlemleme imkânı sağlamıştır.

Galvanostatik Şarj-Deşarj: Elektrot malzemesinin özgül kapasitans değerlerinin hesaplanması, şarj-deşarj stabilitesinin değerlendirilmesi ve enerji depolama performansının belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Farklı akım yoğunluklarında yapılan GCD ölçümleri, elektrotun döngüsel kararlılığı hakkında da bilgi vermiştir.

Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi: Elektrotun içsel direnç özellikleri (R_s), yük transfer direnci (R_{ct}) ve iyon difüzyon davranışlarının (Warburg empedansı, W) incelenmesi için uygulanmıştır. EIS ölçümleri, elektrot tamamen deşarj edilmiş durumda ve açık devre potansiyelinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında, 10 mV genliğinde sinüzoidal bir AC sinyali uygulanmış ve 100 kHz–0.01 Hz frekans aralığında tarama yapılmıştır. Bu yöntem, elektrot-elektrolit arayüzünde gerçekleşen süreçlerin dinamiklerini ve elektrot malzemesinin yük depolama mekanizmasını ayrıntılı şekilde ortaya koymuştur.

3.8 Spesifik kapasitansın hesaplanması

RN@ZnONPs tabanlı elektrot malzemesinin enerji depolama performansını değerlendirmek amacıyla spesifik kapasitans (C_{sp}) değerleri üç farklı elektrokimyasal teknik kullanılarak hesaplanmıştır: CV, GCD ve EIS. Bu hesaplamalarda literatürde belirtilen bağıntılar esas alınmıştır (Ratha ve Samantara, 2018; Saka ve Levent, 2024a).

1. CV ölçümlerden spesifik kapasitans: $C_{sp} = \frac{A}{2r\Delta Vm}$

Burada; $A \rightarrow$ CV eğrisi altında kalan alan, $r \rightarrow$ tarama hızı ($V \cdot s^{-1}$), $\Delta V \rightarrow$ potansiyel penceresi (V), $m \rightarrow$ aktif elektrot malzemesinin kütlesi (g) değerlerini ifade etmektedir.

2. GCD eğrilerinden spesifik kapasitans: $C_{sp} = \frac{It_d}{\Delta Vm}$

Burada; $I \rightarrow$ deşarj akımı (A), $t_d \rightarrow$ deşarj süresi (s), $m \rightarrow$ aktif malzeme kütlesi (g), $\Delta V \rightarrow$ potansiyel penceresi (V)'dir.

3. EIS verilerinden spesifik kapasitans: $C_{sp} = \frac{1}{2\pi f m Z''}$ Burada; $f \rightarrow$ uygulanan sinüzoidal sinyalin frekansı (Hz), $m \rightarrow$ aktif elektrot malzemesinin kütlesi (g), $Z'' \rightarrow$ empedansın hayali bileşeni (Ω)'dir.

Özgül kapasitansın yanı sıra, enerji yoğunluğu (E_s) ve güç yoğunluğu (P_s) parametreleri de hesaplanmıştır. Bu büyüklükler, elektrot malzemesinin enerji depolama kapasitesi ve enerji aktarım hızı hakkında kapsamlı bilgiler sağlamaktadır.

4. Enerji yoğunluğu (E_s): $E_s (Wh kg^{-1}) = \frac{\Delta V x I x t_d}{2m}$ Burada; $\Delta V \rightarrow$ potansiyel penceresi (V), $I \rightarrow$ akım (A), $t_d \rightarrow$ şarj süresi (s), $m \rightarrow$ aktif malzeme kütlesi (g)'dir.

5. Güç yoğunluğu (P_s): $P_s (W kg^{-1}) = \frac{E_s}{t_d}$ Burada; $E_s \rightarrow$ enerji yoğunluğu ($Wh \cdot kg^{-1}$), $t_d \rightarrow$ deşarj süresi (s)'dir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. *Ribes Nigrum L.* ve ZnO nanopartiküllerin karakterizasyonu

Tezin bu bölümünde RN@ZnONPs malzemesi, yığın faza kıyasla üstün fiziksel, kimyasal ve elektriksel özellikler göstermektedir. Bu üstün özellikler, malzemenin nanoölçekteki boyut etkisi, yüksek yüzey/hacim oranı ve yüzeydeki aktif merkezlerin artışıyla doğrudan ilişkilidir. Nanoteknoloji ve biyoteknoloji alanlarındaki gelişmeler, bu tür nanomalzemelerin sentezi, karakterizasyonu ve farklı uygulama alanlarına uyarlanmasını mümkün kılmıştır.

Nano boyuttaki malzemeler, genellikle “nanopartiküller” olarak adlandırılan, mikroskobik ölçekteki çok küçük parçacıklardan oluşmaktadır. Bu parçacıkların yapısal ve fonksiyonel özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi, özel olarak geliştirilmiş analiz yöntemleri ve ileri karakterizasyon tekniklerinin kullanımını gerektirmektedir.

RN özütü kullanılarak sentezlenen ZnO nanopartiküllerinin karakterizasyonunda, optik, morfolojik, yapısal ve yüzey özelliklerini ayrıntılı biçimde incelemek amacıyla çeşitli spektroskopik ve mikroskobik tekniklerden yararlanılmıştır. Bu kapsamda, UV-Vis spektroskopisi, SEM, FTIR, XRD, EDX, DLS analizi ve Zeta potansiyel ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Bu analizler aracılığıyla nanopartiküllerin boyut dağılımı, şekli, morfolojisi, kristal yapısı, kimyasal bileşimi ve yüzey yükü gibi temel özellikleri ayrıntılı biçimde belirlenmiştir. Elde edilen veriler, RN@ZnONPs nanomalzemelerinin yapısal düzeni ile elektrokimyasal performansı arasındaki ilişkiyi anlamada temel bir referans oluşturmaktadır.

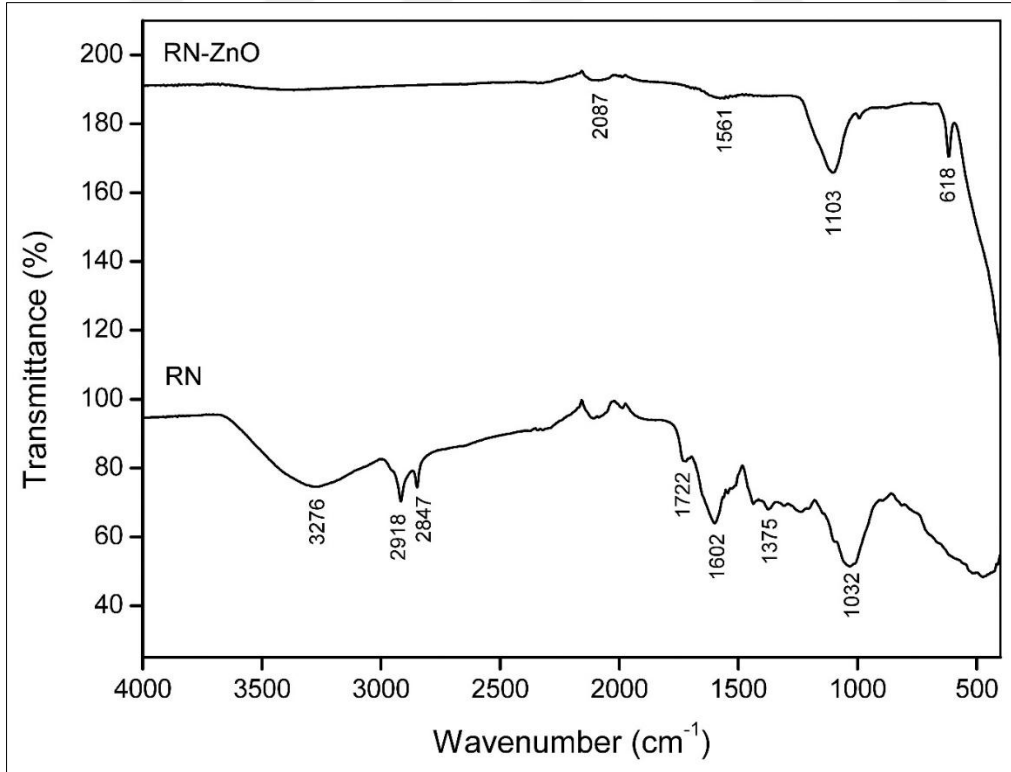
4.1.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Analiz sonuçları

RN ve RN@ZnONPs örneklerinin FTIR spektrumları şekil 4.1’de sunulmuştur. Bu örneklerin yapılarında bulunan fonksiyonel grupların tanımlanması ve ZnO nanopartiküllerinin oluşumunun doğrulanması amacıyla incelenmiştir. RN spektrumunda 3276 cm^{-1} civarında gözlenen geniş bant, fenolik –OH veya –NH gruplarının varlığını

göstermektedir. 2918 ve 2847 cm^{-1} bölgelerinde gözlenen bantlar alifatik C–H gerilmelerine karşılık gelmektedir(Pasieczna-Patkowska vd., 2025). Bununla birlikte 1722 cm^{-1} 'deki keskin bant karbonil (C=O) gruplarının, 1602 cm^{-1} 'deki bant aromatik C=C titreşimlerinin, 1375 cm^{-1} 'deki sinyal C–H bükülmelerinin ve 1032 cm^{-1} 'deki bant ise C–O–C gerilmelerinin varlığını doğrulamaktadır (Tan vd., 2021)

RN@ZnONPs numunesinin FTIR spektrumunda ise 2087 cm^{-1} 'de izosiyanat (–N=C=O) veya C≡N/C≡C gerilmelerine, 1561 cm^{-1} 'de aromatik C=C veya N–H titreşimlerine ve 1103 cm^{-1} 'de C–O–C gerilmelerine karşılık gelen bantlar gözlenmiştir(Gupta vd., 2018). En önemli bulgu ise, 618 cm^{-1} civarında ortaya çıkan karakteristik Zn–O titreşim bandıdır. Bu pik, ZnONPs nanopartiküllerinin başarılı bir şekilde sentezlendiğini açık biçimde doğrulamaktadır.

Ayrıca RN'ye ait bazı fonksiyonel gruplarda gözlenen bant kaymaları ve şiddet azalması, biyolojik bileşenlerin ZnONPs nanopartiküllerinin yüzeyine adsorbe olduğunu ve sentez sürecinde indirgeme ile stabilize edici rol üstlendiğini göstermektedir. Dolayısıyla FTIR sonuçları, RN özütü kullanılarak gerçekleştirilen yeşil sentez sürecinde ZnONPs nanopartiküllerinin oluşumunu ve bitkisel bileşenlerle etkileşimini açık biçimde doğrulamaktadır.



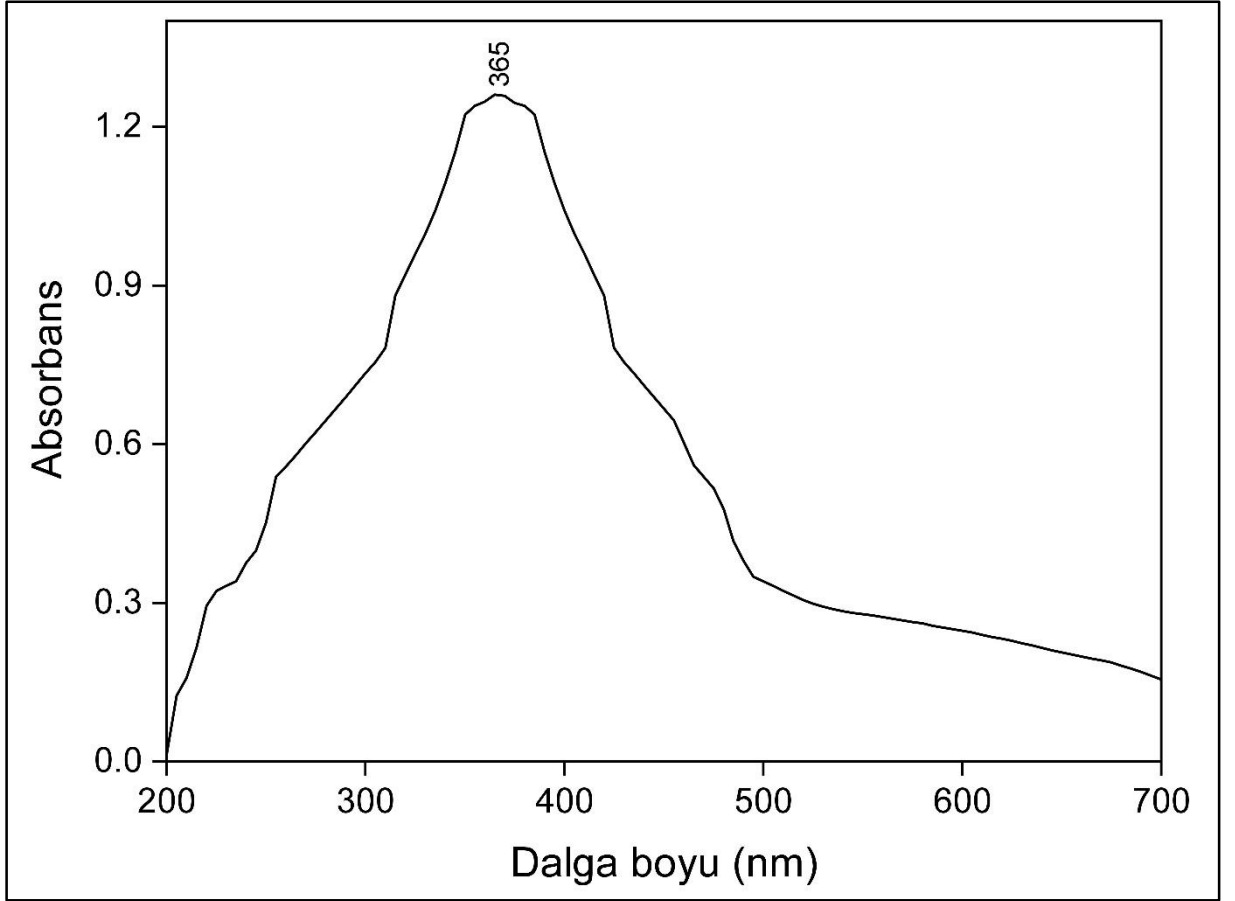
Şekil 4.1 RN bitkisi ve RN@ZnO nanopartiküllerinin FTIR Spektrumu

4.1.2. UV-Vis Analiz sonuçları

RN özütü kullanılarak yeşil sentez yöntemiyle elde edilen RN@ZnO nanopartiküllerinin optik özelliklerini incelemek ve sentezin gerçekleştiğini doğrulamak amacıyla UV-Vis spektroskopik analiz gerçekleştirilmiştir. RN@ZnO nanopartiküllerine ait UV-Vis spektrumu, Şekil 4.2’te gösterildiği üzere yaklaşık 365 nm dalga boyunda belirgin bir maksimum absorpsiyon piki sergilemiştir. Bu bant, ZnO nanopartiküllerinin karakteristik yüzey plazmon rezonansı bölgesinde gözlenen tipik bir soğurma özelliğini temsil etmektedir.

Elde edilen bu sonuç, *Tectona grandis* (L.) yaprak özütü kullanılarak sentezlenen ZnO nanopartiküllerinin 370 nm civarında maksimum absorpsiyon gösterdiğini bildiren (Senthilkumar vd., 2017) tarafından gerçekleştirilen çalışma ile yüksek uyum içindedir. Bu benzerlik, RN özütü kullanılarak gerçekleştirilen yeşil sentez sürecinin başarılı olduğunu ve ZnO nanopartiküllerinin etkili bir şekilde oluştuğunu doğrulamaktadır.

Ayrıca, spektrumda herhangi bir ek absorpsiyon piki gözlenmemesi, sentezlenen RN–ZnO nanopartiküllerinin saflığını ve yüzeyinde belirgin organik kalıntı bulunmadığını göstermektedir (Abdelbaky vd., 2022). Bu bulgu, RN özütündeki biyomoleküllerin hem indirgeme hem de stabilize edici ajan olarak görev yaptığını ve ZnO nanopartiküllerinin tek fazlı, homojen yapıda oluşumunu desteklediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.2. RN özütü kullanılarak biyosentezlenen RN-ZnO NP'lerin UV/Görünür spektrumu.

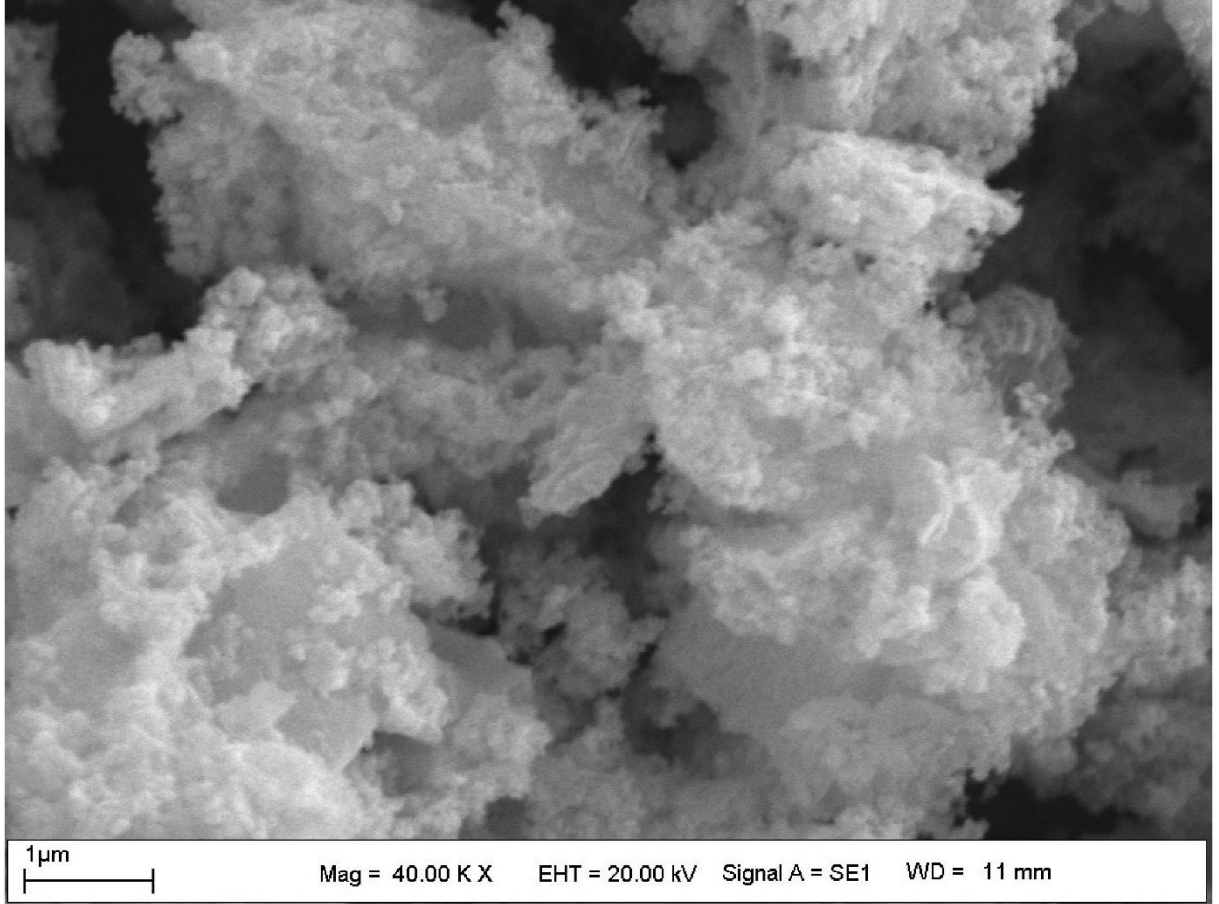
4.1.3. Taramalı Elektron Mikroskobu Analiz sonuçları

RN özütü kullanılarak sentezlenen ZnO nanopartiküllerinin yüzey morfolojisi, SEM analizi ile incelenmiştir. Şekil 4.3'te verilen SEM görüntüleri, nanopartiküllerin düzensiz yüzey morfolojisine sahip olduğunu ve belirgin şekilde aglomere yapı oluşturduklarını göstermektedir. Bu aglomerasyonun, ZnO nanopartiküllerinin yüksek yüzey enerjisi ile RN özütünde bulunan biyomoleküller arasındaki etkileşimlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Partiküllerin ortalama boyutlarının nanometre ölçeğinde (yaklaşık 50–100 nm) olduğu, ancak bir araya gelerek mikrometre altı boyutlarda yoğun kümelenmeler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Yüzey morfolojisinin gözenekli, pamuksu ve heterojen bir yapıda olması, RN özütündeki fenolik bileşikler, flavonoidler ve organik asitlerin indirgeme ve kaplama ajanı olarak aktif rol üstlenmesiyle ilişkilendirilmektedir.

Bu biyomoleküllerin, Zn^{2+} iyonlarının ZnO nanopartiküllerine dönüşümü sırasında nükleasyon ve büyüme mekanizmalarını yönlendirdiği; dolayısıyla partiküllerin

şekil, yüzey pürüzlülüğü ve dağılım özelliklerini etkilediği değerlendirilmektedir(Chnoor Mohammadi, Sarbast A Mahmud, Shorish M Abdulla, 2017; Demissie vd., 2020). Bu bulgular, bitki özütü aracılığıyla gerçekleştirilen yeşil sentez sürecinin, nanopartiküllerin morfolojik yapısını ve stabilitesini doğrudan etkileyen önemli bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.3. RN@ZnO Nanopartiküllerinin SEM görüntüsü

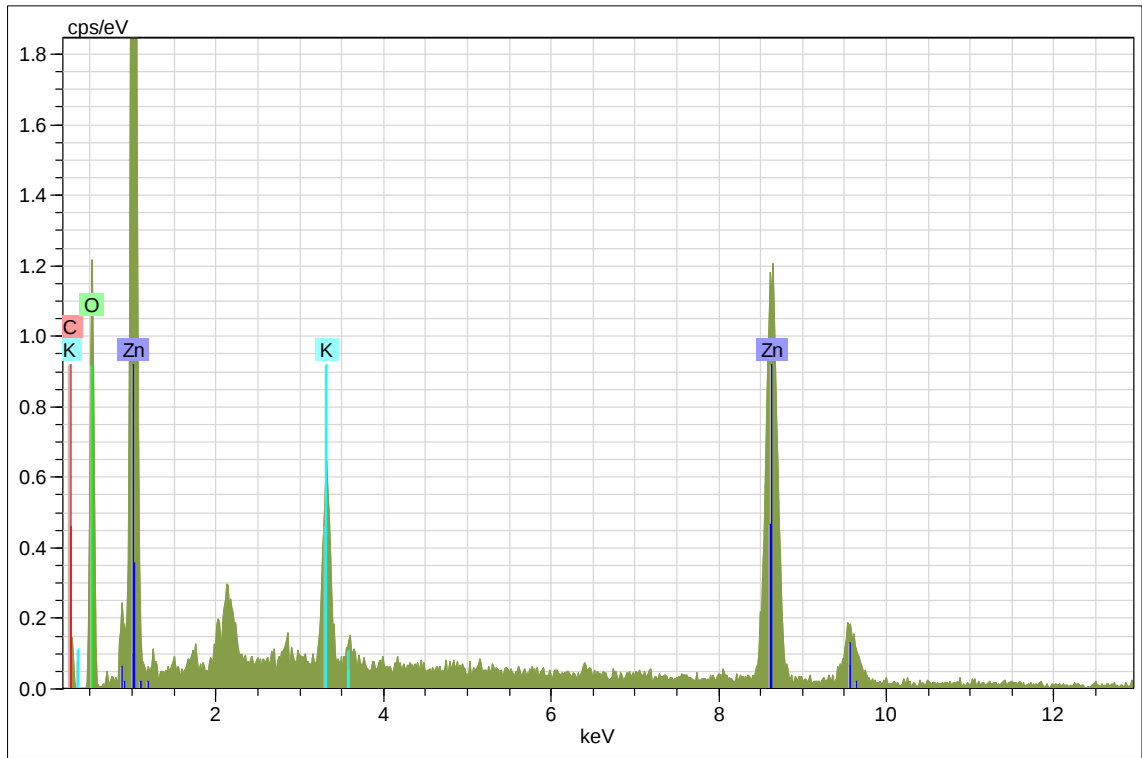
4.1.4. Enerji dağılımlı X-Işını spektroskopisi analiz sonuçları

RN@ZnO nanopartiküllerinin elementel bileşimi ve yapısal konfigürasyonu, EDX spektroskopisi ile değerlendirilmiştir. Elde edilen EDX spektrumu (Şekil 4.4), nanopartiküllerde çinko (Zn) ve oksijen (O) elementlerinin belirgin varlığını ortaya koyarak ZnO oluşumunu doğrulamaktadır. Ayrıca, karbon (%15,95) ve potasyum (%6,57) elementlerine ait sinyaller de tespit edilmiştir. Bu elementlerin, sentez sürecinde kullanılan RN özütünden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Zn ve O elementlerinin ağırlık yüzdeleri sırasıyla %60,39 ve %17,08 olarak hesaplanmıştır. Yüksek karbon oranı, RN özütündeki organik bileşiklerin nanopartikül

yüzeyinde kaplama ajanı olarak adsorbe olduğunu göstermektedir. Bu durum, yeşil sentez yaklaşımının karakteristik bir sonucu olup, nanopartiküllerin yüzey stabilitesini artırmakta ve aglomerasyonu sınırlamaktadır.

Elde edilen elementel dağılım sonuçları, bitkisel özüt aracılığıyla sentezlenen ZnO nanopartiküllerinin elementel kompozisyonunu inceleyen önceki çalışmalarla uyum içindedir (Agarwal ve Shanmugam, 2020; Kamal vd., 2024). Bu bulgular, RN@ZnO nanopartiküllerinin yeşil sentez mekanizmasının başarıyla gerçekleştiğini ve bitki bileşenlerinin nanopartikül yüzeyine entegre olduğunu açık biçimde desteklemektedir.

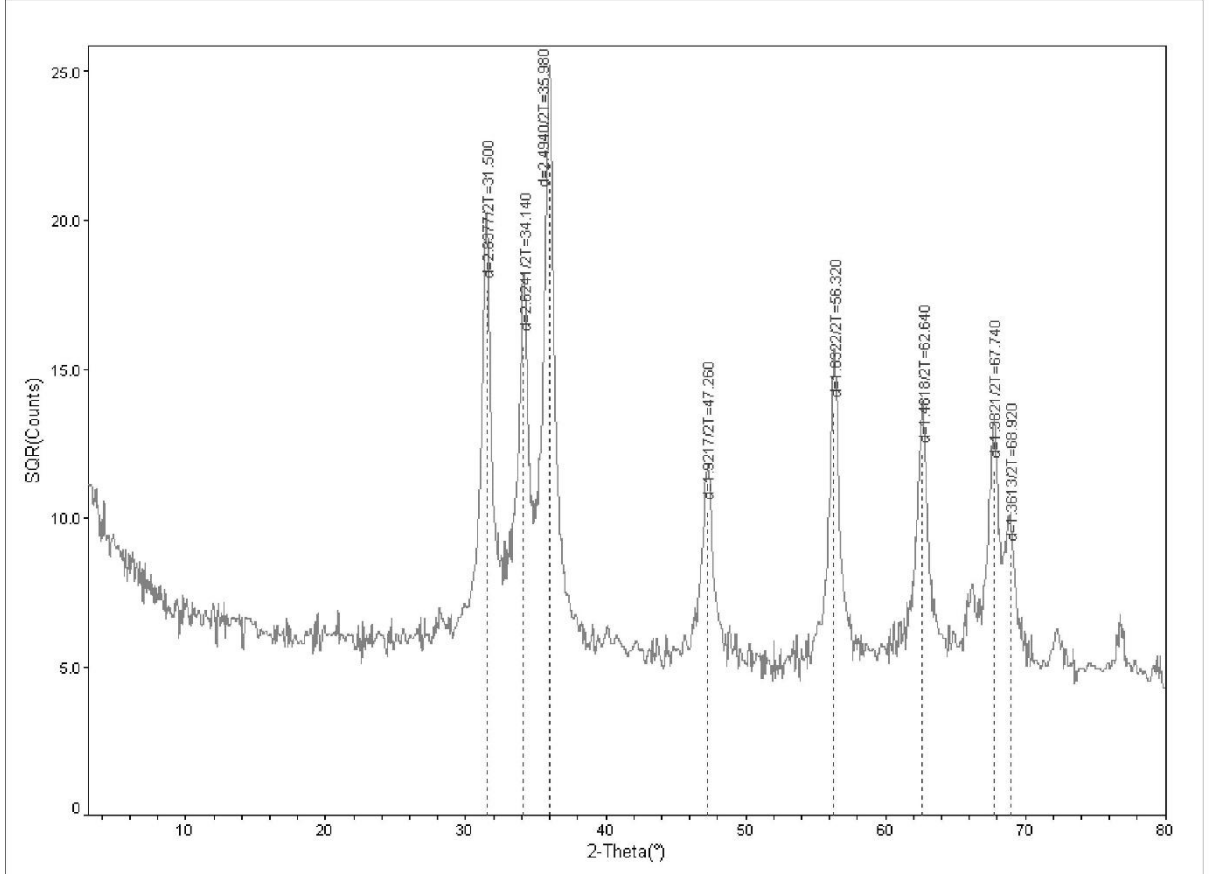


Şekil 4.4 RN@ZnONPs numunesinin EDX sonuçları

4.1.5. X-ışını difraksiyonu analiz sonuçları

Biyosentezlenen RN@ZnONPs nanopartiküllerinin yapısal özellikleri, XRD yöntemiyle incelenmiştir. Toz haline getirilmiş örneğin XRD deseni, yüksek kristalliliğe sahip bir yapı sergilemiştir. Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, biyofabrikasyonla elde edilen nanopartiküller 2 θ değerlerine karşılık gelen yedi belirgin difraksiyon tepe noktası göstermiştir: 31,50°, 34,14°, 35,98°, 47,26°, 56,32°, 62,64° ve 67,74°. Bu tepe noktaları sırasıyla (100), (002), (101), (102), (110), (103) ve (200) kristal düzlemleriyle eşleşmektedir.

RN@ZnO nanopartiküllerine ait XRD deseninin, JCPDS Kart No. 01-075-0576 ile uyumlu olduğu belirlenmiş ve böylece nanopartiküllerin altıgen wurtzite fazına sahip olduğu doğrulanmıştır. Ortalama kristal boyutu, Debye–Scherrer denklemi kullanılarak yaklaşık 28,67 nm olarak hesaplanmıştır. Ayrıca XRD spektrumlarında gözlenen düşük yoğunluklu bazı ek tepe noktalarının, nanopartikül yüzeyinde bulunan organik bileşiklerin veya bitki özütüne ait kalıntıların kısmi kristalleşmesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir (Abdelbaky vd., 2022; Hameed vd., 2023).



Şekil 4.5 RN-ZnO nanopartiküllerin X-ışını kırınım deseni

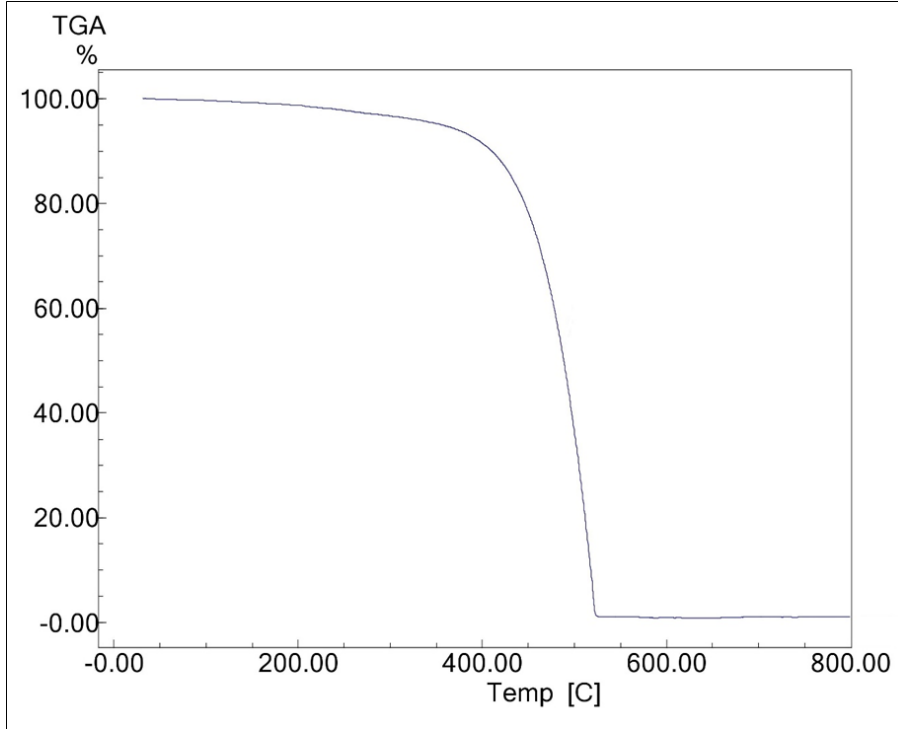
4.1.6. Termogravimetrik Analiz sonuçları

TGA ve diferansiyel termal analiz (DTA) sonuçları, RN özütü kullanılarak sentezlenen ZnO nanopartiküllerinin termal davranışını ve faz stabilitesini açık bir biçimde ortaya koymaktadır (Şekil 4.6). TGA eğrisinde 150 °C'nin altında gözlenen hafif kütle kaybı, numune yüzeyinde adsorbe olmuş nemin ve düşük molekül ağırlıklı uçucu bileşiklerin uzaklaşmasına atfedilmektedir.

150–400 °C sıcaklık aralığında kademeli olarak meydana gelen kütle kaybı, biyosentez sürecinde indirgeme ve stabilize edici ajan olarak görev yapan polifenoller,

flavonoidler ve diğer fitokimyasalların termal bozunmasından kaynaklanmaktadır. Bu süreç, DTA eğrisinde gözlenen endotermik ve ekzotermik geçişlerle desteklenmiş olup, organik bileşenlerin ardışık parçalanma reaksiyonlarını yansıtmaktadır. 400–550 °C aralığında kaydedilen keskin kütle kaybı, yüzeydeki organik kaplama tabakasının tamamen uzaklaştığını ve ZnO nanopartiküllerinin inorganik çekirdeğinin ortaya çıktığını göstermektedir. Aynı sıcaklık aralığında gözlenen belirgin ekzotermik pik, organik bileşenlerin yanmasıyla eşzamanlı olarak ZnO kristalleşme sürecinin gerçekleştiğini göstermektedir (Şekil 4.6). 550 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kütlenin sabitlenmesi, ZnO nanopartiküllerinin termodinamik olarak kararlı bir fazda olduğunu ve yüksek sıcaklıklarda bozunmaya uğramadığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, RN özütünden elde edilen fitokimyasalların sentez sürecinde etkin bir indirgeme ve kaplama rolü üstlendiğini; ancak kontrollü ısı işlem sonrasında bu organik kalıntıların tamamen uzaklaştığını doğrulamaktadır. Böylece geriye yalnızca kristalin ZnO fazı kalmakta ve bu faz yüksek sıcaklıklarda dahi yapısal bütünlüğünü koruyabilmektedir.

Elde edilen bu bulgular, yeşil sentez yöntemiyle üretilen ZnO nanopartiküllerinin yüksek termal stabiliteye ve faz kararlılığına sahip olduğunu göstermekte olup, benzer şekilde literatürde bildirilen çalışmalarla uyum içerisindedir (Alzahrani vd., 2023; Eleryan vd., 2023; Khan vd., 2021).



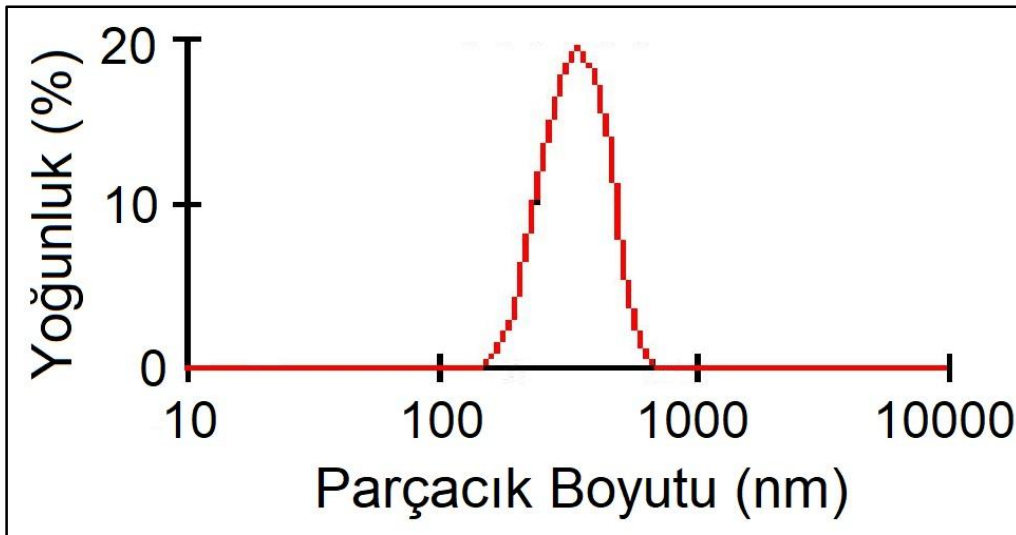
Şekil 4.6. RN@ZnO nanopartiküllerinin TGA grafiği

4.1.7. Dinamik Işık Saçılımı Analiz sonuçları

Biyosentezlenen RN@ZnO nanopartiküllerinin hidrodinamik boyutu, DLS yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, RN@ZnO nanopartiküllerinin ortalama hidrodinamik çapı yaklaşık 369,8 nm olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.7). Boyut dağılım eğrisi, partiküllerin polidispers bir dağılıma sahip olduğunu göstermektedir.

DLS analizinde belirlenen bu nispeten yüksek boyut değeri, yöntemin doğası gereği aglomere olmuş partikülleri veya küçük kümelenmeleri tek bir büyük parçacık olarak ölçme eğiliminden kaynaklanmaktadır. Bu durum, özellikle biyosentezle elde edilen nanopartiküllerde yüzeydeki organik bileşiklerin (fenolikler, flavonoidler vb.) partikül birikimine yol açmasıyla açıklanabilir.

Elde edilen sonuçlar, *Myristica fragrans* meyve özütü kullanılarak sentezlenen ZnO nanopartiküllerinin benzer boyut aralığında (350–400 nm) bulunduğunu bildiren önceki çalışmalarla tutarlıdır (Faisal vd., 2021). Bu bulgular, RN@ZnO nanopartiküllerinin sulu ortamda iyi dağılmış ancak belirli düzeyde aglomerasyon eğilimi gösteren stabil bir yapıya sahip olduğunu doğrulamaktadır.



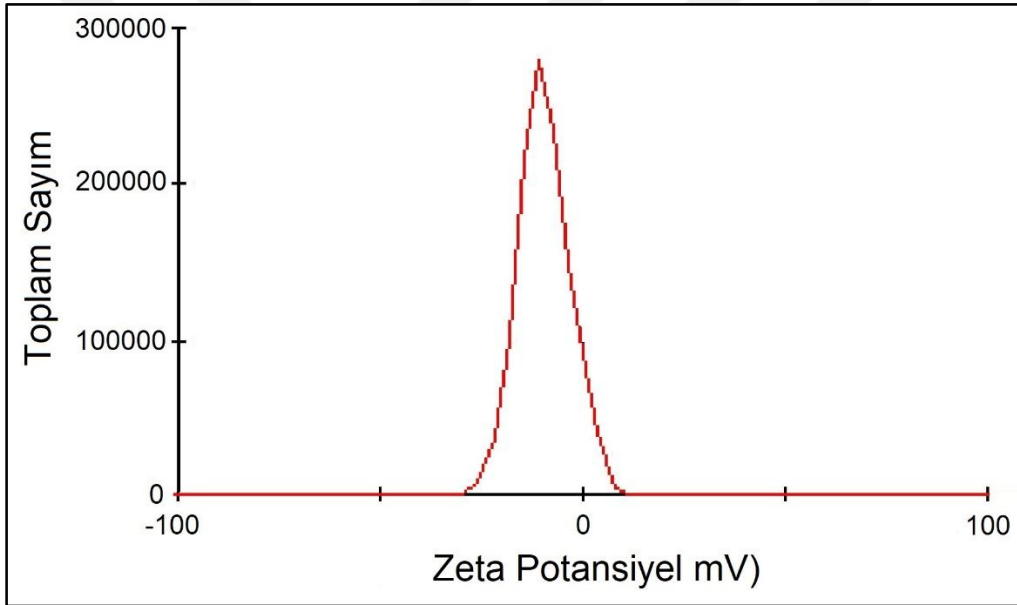
Şekil 4.7. RN-ZnO nanopartiküllerin DLS parçacık boyut analizi

4.1.8. Zeta Potansiyel analiz sonuçları

Biyosentez tekniğiyle sentezlenen RN@ZnO nanopartiküllerinin yüzey yükünü belirlemek amacıyla zeta potansiyel analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara

göre, RN@ZnO nanopartiküllerinin ortalama zeta potansiyel değeri $-9,53$ mV olarak ölçülmüştür (Şekil 4.8). Bu değer, nanopartikül yüzeyinde bulunan biyomoleküllerin çoğunlukla negatif yüklü fonksiyonel gruplardan (örneğin $-\text{COO}^-$, $-\text{OH}^-$ veya $-\text{NH}^-$) oluştuğunu göstermektedir.

Tespit edilen negatif yüzey yükü, RN özütünde yer alan fenolik bileşikler ve organik asitlerin ZnO nanopartiküllerinin yüzeyine bağlanarak elektrostatik kararlılığın sağlanmasına katkıda bulunduğunu göstermektedir. Ayrıca bu negatif yük, nanopartiküller arasında belirli düzeyde elektrostatik itme oluşturarak sistemin kolloidal stabilitesini artırmaktadır. Bu bulgu, biyojenik ZnO nanopartiküllerinin negatif yüzey yüküne sahip olduğunu ve biyomoleküler kaplama sayesinde sulu ortamda kararlı bir şekilde dağılabildiğini bildiren önceki çalışmalarla uyum içindedir (Yassin vd., 2022).



Şekil 4.8. Biyosentezlenen RN@ZnO nanopartiküllerin zeta potansiyeli analizi

4.2. Elektrokimyasal karakterisasyon sonuçları

Bu bölümde, RN meyve özütü kullanılarak yeşil sentez yöntemiyle elde edilen RN@ZnONPs malzemesinin enerji depolama performansı elektrokimyasal teknikler aracılığıyla değerlendirilmiştir. Elektrot malzemesinin elektrokimyasal davranışını incelemek amacıyla CV, GCD ve EIS ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal ölçümler bölüm 3.6'da ifade edildiği gibi gerçekleştirildi. Bu teknikler, RN@ZnONPs'in kapasitif özelliklerinin, yük transfer kinetiğinin ve iç direnç bileşenlerinin belirlenmesinde önemli bilgiler sağlamaktadır. Elde edilen veriler, malzemenin

süperkapasitör uygulamalarına uygunluğunu ortaya koymak ve elektrokimyasal enerji depolama mekanizmasını aydınlatmak amacıyla detaylı olarak analiz edilmiştir.

4.2.1. Döngülü Voltammetri Sonuçları

RC@ZnONPs elektrotunun elektrokimyasal enerji depolama performansı, farklı elektrolit ortamlarında ve değişen tarama hızlarında gerçekleştirilen CV ölçümleri ile incelenmiştir. Şekil 4.9a'da, 1 M H₂SO₄ (asidik, siyah renk), 1 M Na₂SO₄ (nötral, kırmızı renk) ve 1 M KOH (bazik, mavi renk) elektrolit çözeltilerinde 5 mV/s tarama hızında kaydedilen CV eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 5 mV/s tarama hızında hesaplanan C_{sp} değerleri sırasıyla 209.05 F·g⁻¹ (H₂SO₄), 119.89 F·g⁻¹ (Na₂SO₄) ve 94.04 F·g⁻¹ (KOH) olarak bulunmuştur. Bu değerler, RC@ZnONPs elektrotunun asidik ortamda belirgin şekilde daha yüksek bir kapasitif performans sergilediğini göstermektedir.

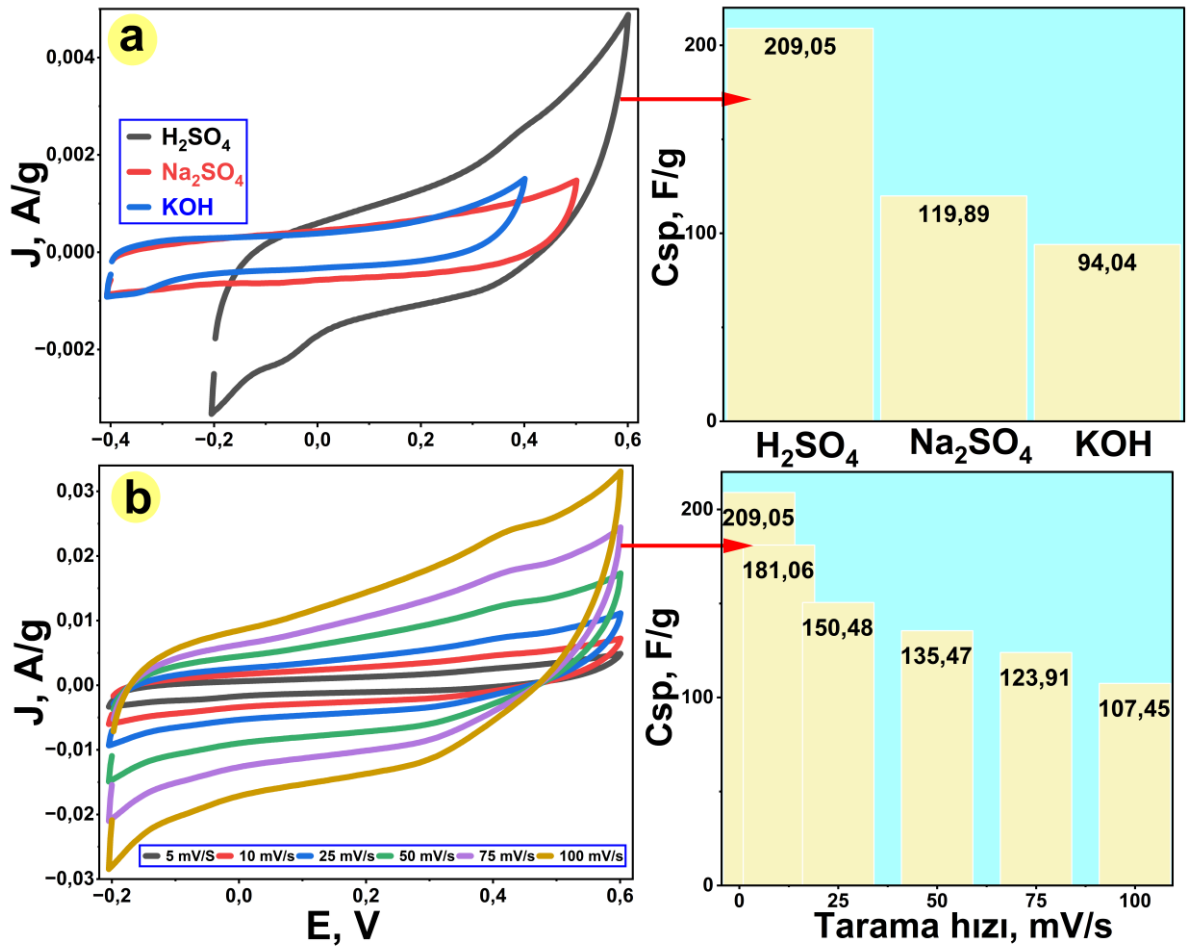
Sülfürik asit ortamında gözlenen bu yüksek kapasitansın başlıca nedenleri; (i) H₂SO₄'ün yüksek iyonik iletkenliği ve protonların (H⁺) hızlı taşınımı, (ii) protonların küçük hidrate iyon yarıçapı sayesinde elektrot yüzeyine ve gözenek yapısına daha kolay nüfuz edebilmesi, ve (iii) RN özütünden kaynaklanan organik fonksiyonel gruplar ile ZnO yüzeyinde gerçekleşen ek redoks (pseudokapasitif) katkılardır (Bhojane, 2022; Levent ve Saka, 2024a; Saka ve Levent, 2024a). Bu etmenlerin sinerjik etkisi, CV eğrilerinin kapladığı alanı ve dolayısıyla hesaplanan özgül kapasitans değerini artırmaktadır.

Nötral (Na₂SO₄) ve bazik (KOH) ortamlarda ise daha büyük hidrate iyonların (Na⁺, K⁺) gözenek içerisine difüzyonunun sınırlanması ve elektrot–elektrolit etkileşimlerinin farklılaşması sonucu daha düşük C_{sp} değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.9a'daki eğrilerin genel formu kısmen dikdörtgensel bir karakter sergilemekte olup, bu durum EDLC benzer bir davranışa işaret etmektedir. Bununla birlikte, özellikle H₂SO₄ ortamında CV eğrilerinin alanında gözlenen artış ve hafif dalgalı profil, sistemde yüzey redoks süreçlerinin varlığına, dolayısıyla pseudokapasitif katkıların da önemli bir rol oynadığına işaret etmektedir.

1 M H₂SO₄ ortamında farklı tarama hızlarında hesaplanan özgül kapasitans ve korunma oranları sırasıyla 5 mV/s'de 209.05 F·g⁻¹ (%100), 10 mV/s'de 181.06 F·g⁻¹ (%86.61), 25 mV/s'de 150.48 F·g⁻¹ (%71.98), 50 mV/s'de 135.47 F·g⁻¹ (%64.80), 75 mV/s'de 123.91 F·g⁻¹ (%59.27) ve 100 mV/s'de 107.45 F·g⁻¹ (%51.40) olarak

hesaplanmıştır (Şekil.4.9b). Tarama hızının artışıyla birlikte C_{sp} değerlerinde belirgin bir azalma gözlenmiştir; bu durum, iyon difüzyon kinetiğinin sınırlanmasından kaynaklanmaktadır. Düşük tarama hızlarında elektrolit iyonları, elektrot yüzeyine ve gözeneklerin derinliklerine etkin biçimde ulaşabildiğinden, hem çift tabaka hem de pseudokapasitif katkılar tam olarak ortaya çıkar. Buna karşın, yüksek tarama hızlarında iyon taşınımı ve yük transferi sınırlamaları nedeniyle yalnızca yüzeyin dış tabakası etkin hale gelir ve buna bağlı olarak ölçülen yük miktarı ile özgül kapasitans azalır (Bhojane, 2022; Levent ve Saka, 2024a).

Ayrıca, tarama hızının artmasıyla CV eğrilerinde içbükeyliğin azalması ve kenar sıkışmasının gözlenmesi, elektrot–elektrolit arayüzünde kinetik sınırlamaların baskın hale geldiğini göstermektedir (Bhojane, 2022; Chen, 2021; Saka ve Levent, 2024a). Özellikle düşük hızlarda H_2SO_4 ortamında elde edilen daha geniş eğri alanı ve belirgin dalgalı profil, RN özütünden kaynaklanan organik fonksiyonel grupların ve ZnO yüzeyinin redoks süreçlerinden kaynaklanan belirgin pseudokapasitif katkılarının varlığını desteklemektedir.



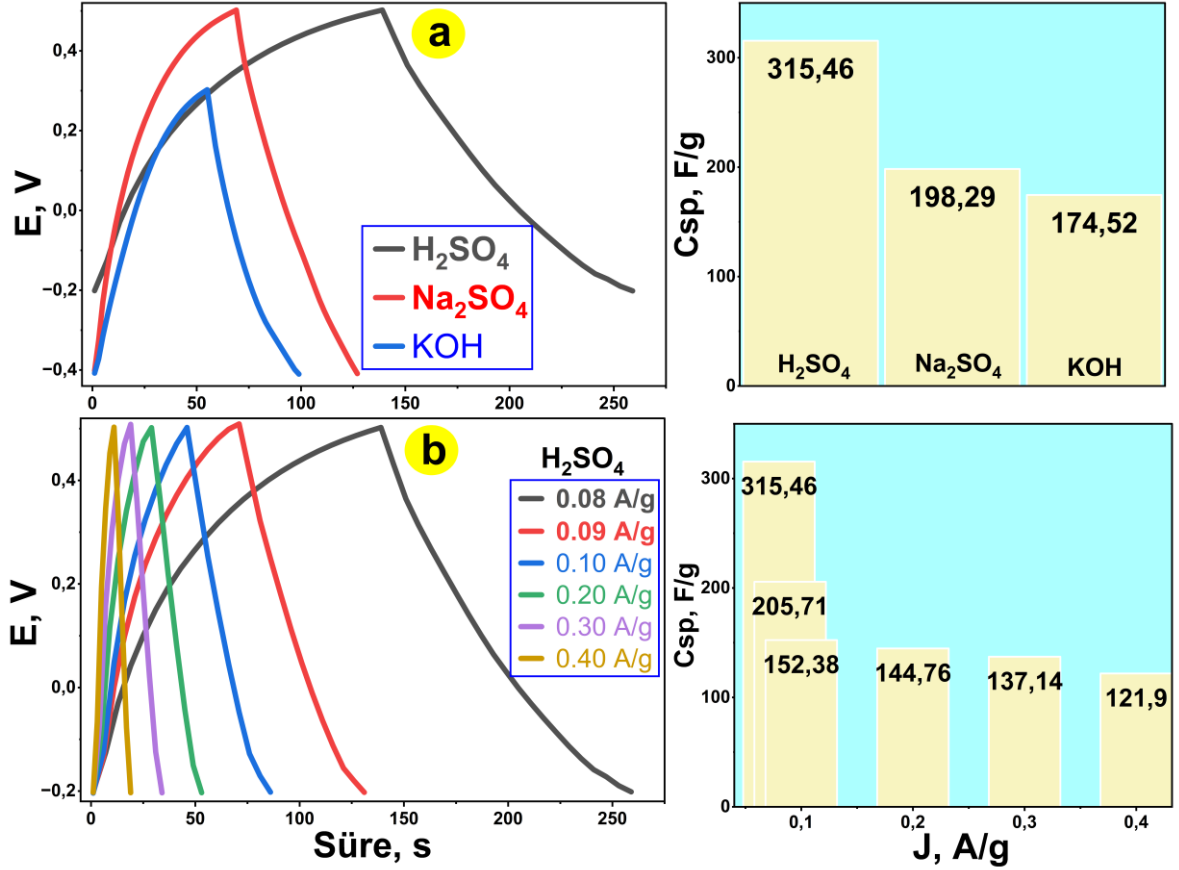
Şekil 4.9. RC@ZnONPs'in elektrokimyasal performansı: (a) 1 M H₂SO₄, Na₂SO₄ ve KOH çözeltilerinde (10 mV/s) elde edilen CV eğrileri ve bunlara karşılık gelen özgül kapasitans değerleri, (b) 1 M H₂SO₄ ortamında farklı tarama hızlarında kaydedilen CV eğrileri ve tarama hızına bağlı özgül kapasitans değerleri.

4.2.2 Şarj-Deşarj Analiz Sonuçları

RC@ZnONPs tabanlı elektrotların kapasitif enerji depolama davranışları, farklı elektrolit çözeltilerinde ve değişen akım yoğunluklarında gerçekleştirilen GCD ölçümleriyle değerlendirilmiştir. Şekil 4.10a'da, 0,08 A·g⁻¹ akım yoğunluğunda 1 M H₂SO₄, 1 M Na₂SO₄ ve 1 M KOH çözeltilerinde kaydedilen GCD eğrileri ve bu ortamlarda hesaplanan C_{sp} değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Görüldüğü üzere, en uzun şarj-deşarj süresi ve en yüksek C_{sp} değeri H₂SO₄ çözeltisinde elde edilmiştir. Bu ortamda hesaplanan C_{sp} 315,46 F·g⁻¹ iken, Na₂SO₄ ve KOH çözeltilerinde sırasıyla 198,29 F·g⁻¹ ve 174,52 F·g⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Bu bulgular, RC@ZnONPs elektrotlarının asidik ortamda daha yüksek iyon iletkenliği ve etkin yük depolama kapasitesi sergilediğini açıkça göstermektedir. Sülfürik asit çözeltisinde gözlenen bu artış, protonların (H⁺) yüksek iletkenliği ve küçük iyon

boyutları sayesinde gözenekli elektrot yapısına kolaylıkla difüze olabilmeleriyle ilişkilendirilebilir(Bhojane, 2022; Levent ve Saka, 2024b; Ruiz vd., 2009). Bu durum, elektrot–elektrolit arayüzünde daha hızlı yük transferine olanak sağlayarak kapasitans değerlerini artırmaktadır. Ayrıca, bu sonuçların CV analizlerinden elde edilen verilerle (Şekil 4.9a) tutarlı olduğu belirlenmiştir.

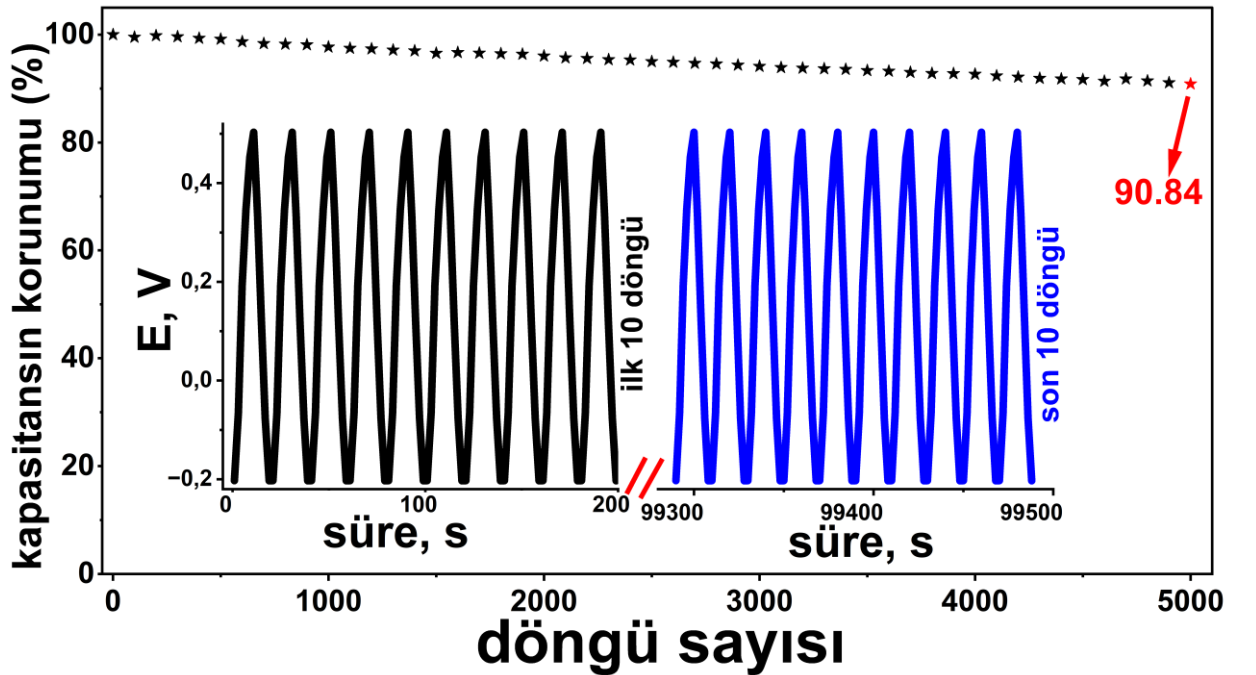


Şekil 4.10. RC@ZnONPs tabanlı süperkapasitörün elektrokimyasal performansı: (a) 1 M H_2SO_4 , 1 M Na_2SO_4 ve 1 M KOH çözeltilerinde 0.08 A/g akım yoğunluğunda kaydedilen GCD eğrileri ve bu ortamlarda hesaplanan özgül kapasitans değerleri, (b) 1 M H_2SO_4 çözeltisinde farklı akım yoğunluklarında elde edilen GCD eğrileri ve bunlara karşılık hesaplanan özgül kapasitans değerleri.

Şekil 4.10b’de, RC@ZnONPs elektrodunun 1 M H_2SO_4 ortamında farklı akım yoğunluklarında (0.08–0.40 Ag^{-1}) kaydedilen GCD eğrileri ve hesaplanan C_{sp} değerleri sunulmaktadır. Tüm akım yoğunluklarında gözlenen düzgün ve simetrik eğriler, elektrot malzemesinin iyi şarj–deşarj reversibilitesine ve yüksek kapasite kararlılığına sahip olduğunu göstermektedir(Manohar vd., 2023). Düşük akım yoğunluğunda (0.08 $A \cdot g^{-1}$) 315.46 Fg^{-1} olarak hesaplanan özgül kapasitans değeri, akım yoğunluğu arttıkça kademeli olarak azalmıştır. 0.09, 0.10, 0.20, 0.30 ve 0.40 Ag^{-1} akım yoğunluklarında sırasıyla

205.71, 152.38, 144.76, 137.14 ve 121.90 $\text{F}\cdot\text{g}^{-1}$ değerleri elde edilmiştir. Bu azalış, artan akım yoğunluğunda iyon difüzyonunun sınırlanmasıyla ilişkilidir; düşük akım yoğunluklarında iyonlar gözenekli yapıya daha etkin biçimde nüfuz ederken, yüksek akım yoğunluklarında yalnızca yüzey tabakası etkin hale gelir ve depolanan yük miktarı azalır.

Literatürde rapor edilen benzer çalışmalar, ZnO ve biyotemplat destekli elektrotların özellikle asidik ortamlarda daha yüksek performans sergilediğini göstermektedir. Örneğin, Liu ve ark. (2021), bitki ekstraktı kullanılarak sentezlenen ZnO elektrotlarda 1 M H_2SO_4 çözeltisinde yaklaşık $280 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ özgül kapasitans bildirmiştir. Benzer şekilde, Kumar ve ark. (2022) biyopolimer destekli ZnO elektrotlarda $290 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ seviyelerinde kapasitans değerleri elde etmişlerdir. Bu verilerle karşılaştırıldığında, RC@ZnONPs elektrotlarının $315.46 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ değerine ulaşması, biyotemplatın iyon difüzyonunu kolaylaştırıcı etkisi ve gözenekli yapısının yük depolamayı artırıcı rolüyle açıklanabilir.



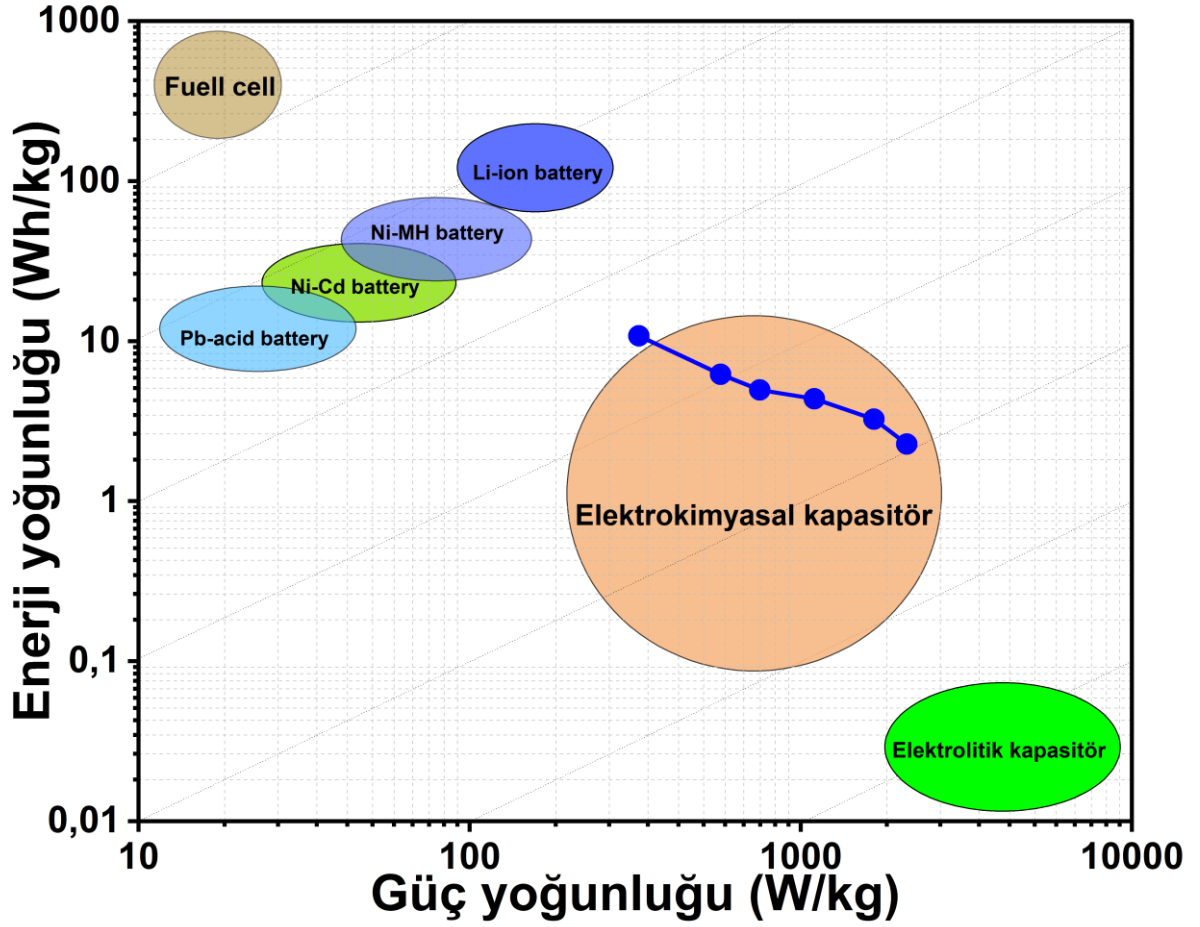
Şekil 4.11. RC@ZnONPs tabanlı süperkapasitörün 1 M H_2SO_4 ortamında 5000 çevrim boyunca elde edilen Coulombik verimlilik verileri.

RC@ZnONPs malzemesinin uzun vadeli elektrokimyasal kararlılığı, 1 M H_2SO_4 elektrolit ortamında $0.4 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ akım yoğunluğunda 5000 döngüye kadar gerçekleştirilen GCD testleriyle değerlendirilmiştir. Şekil 4.11’te, testin başlangıcındaki ilk 10 döngü ile son evredeki son 10 döngüye ait eğriler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Eğrilerin tüm

döngüler boyunca simetrik formunu koruması, malzemenin şarj–deşarj süreçleri sırasında yüksek reversibilite gösterdiğini ve yapısal bütünlüğünü koruduğunu kanıtlamaktadır. 5000 döngü sonunda başlangıç kapasitesinin %90.84'ünün korunması, yeşil sentez yöntemiyle elde edilen RN@ZnONPs malzemesinin mükemmel döngü kararlılığına sahip olduğunu göstermektedir(Manohar vd., 2023; Ruiz vd., 2009). Bu üstün kararlılık, gözenekli yapının iyon taşınımını kolaylaştırması, yapısal dayanıklılığın hacim değişimlerine karşı koruyuculuk sağlaması ve ZnO yüzeyinin kimyasal stabilitesini sürdürmesiyle açıklanabilir.

Son olarak, RN@ZnONPs elektrotunun enerji ve güç yoğunlukları arasındaki ilişki, 1 M H₂SO₄ elektrolit ortamında oluşturulan Ragone grafiği (Şekil 4.12) üzerinden değerlendirilmiştir. Ragone eğrisi, yüksek güç yoğunluklarında dahi enerji yoğunluğunun önemli ölçüde korunduğunu göstermektedir. Hesaplamalar sonucunda güç yoğunlukları sırasıyla 324.33, 572.75, 752.50, 1098.42, 1662.54 ve 2090.64 W·kg⁻¹; bu değerlere karşılık gelen enerji yoğunlukları ise 10.82, 6.22, 4.96, 4.36, 3.25 ve 2.78 Wh·kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, RN@ZnONPs elektrodunun klasik elektrolitik kapasitörlere kıyasla çok daha yüksek enerji yoğunlukları sunduğunu, ayrıca tipik elektrokimyasal kapasitörlerle benzer veya daha üstün performans sergilediğini göstermektedir(Ratha ve Samantara, 2018).

Sonuç olarak, RN@ZnONPs tabanlı süperkapasitör, yüksek özgül kapasite ve uzun döngü ömrü gibi özelliklerinin yanı sıra hem yüksek güç hem de makul enerji yoğunluğu gerektiren taşınabilir elektronikler, hibrit araçlar ve ani enerji gereksinimi olan sistemlerde kullanılabilecek, çevre dostu ve verimli bir enerji depolama malzemesi adayı olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 4.12. RN@ZnONPs süperkapasitörüne ait güç ve enerji yoğunluklarının Ragone grafiği eğrisi.

4.2.3 Elektrokimyasal empedans spektroskopisi

RN@ZnONPs hibrit elektrot malzemesinin elektrokimyasal performansı, farklı elektrolit ortamlarında gerçekleştirilen EIS analizi ile değerlendirilmiştir (Şekil 4.13). Ölçülen empedans verileri, R_s (ESR) + $[R_{ct} \parallel CPE]$ + Warburg (Z_w) eşdeğer devre modeli kullanılarak fit edilmiştir.

Nyquist diyagramları (Şekil 4.13a) incelendiğinde, tüm elektrolit ortamlarında belirgin bir yarım daire formu gözlenmemiş, bunun yerine eğik çizgisel davranışlar dikkat çekmiştir. Bu durum, sistemde çift tabaka kapasitif davranışın baskın olduğunu ve yük transfer sürecinin deneysel frekans aralığında görece sınırlı veya gizli kaldığını göstermektedir. Nyquist eğrilerinde yarım dairenin belirgin olmaması; (i) yük transfer direncinin (R_{ct}) küçük olması veya yüksek frekans bölgesinde sınırlı gözlenmesi, (ii) gözenekli elektrot yapısına bağlı zaman sabitlerinin dağılımı (yüzey heterojenliği) ve (iii)

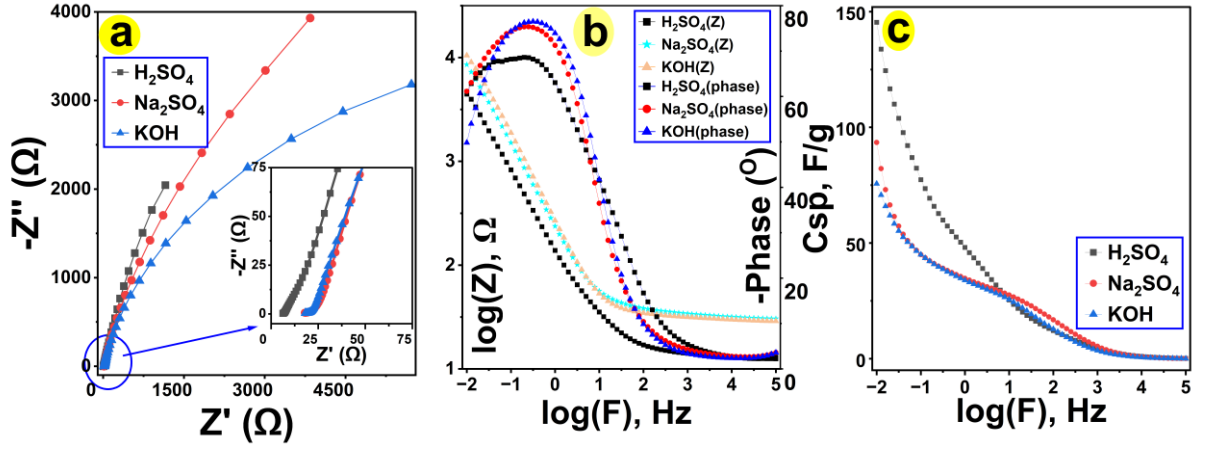
difüzyon kontrollü (Warburg tipi) süreçlerin baskınlığı ile ilişkilendirilebilir (Lazanas ve Prodromidis, 2023).

Eşdeğer devre modellemesinde kullanılan CPE (Constant Phase Element), gözenekli ve heterojen yüzey yapısından kaynaklanan ideal olmayan kapasitif davranışı temsil ederken; Warburg elemanı (Zw), iyon difüzyon etkisini yansıtmaktadır. Rct değeri belirgin bir yarım daireyle ayrıştırılamadığından, modelde CPE ve Warburg etkileriyle birlikte parametrik olarak belirlenmiştir. Fit sonucu elde edilen seri direnç (Rs veya ESR) değerleri 1 M H₂SO₄, 1 M Na₂SO₄ ve 1 M KOH çözeltileri için sırasıyla 22.45 Ω , 46.43 Ω ve 48.89 Ω olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, asidik ortamda daha düşük iç direnç ve dolayısıyla daha hızlı iyon/elektron taşınımı gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca H₂SO₄ ortamının, diğer çözeltilere kıyasla hem daha düşük ESR hem de daha düşük yük transfer direnci sağlaması, elektrot-elektrolit arayüzünde daha etkin iyon alışverişine olanak tanıdığı şeklinde yorumlanabilir (Ibukun ve Jeong, 2019; Levent ve Saka, 2024b; Mendhe ve Panda, 2023; Patel vd., 2024; Srividhya ve Ponpandian, 2024). Bu durum, asidik ortamın yüksek iletkenliği ve düşük ESR değeri sayesinde enerji depolama kapasitesinin en yüksek seviyeye ulaşmasını desteklemektedir (Patel vd., 2024).

Bode faz diyagramları (Şekil 4.13b) incelendiğinde, maksimum faz açıları H₂SO₄, Na₂SO₄ ve KOH ortamlarında sırasıyla 71.16°, 69.12° ve 49.65° olarak belirlenmiştir. H₂SO₄ ortamında gözlenen yüksek faz açısı, RN@ZnONPs elektrotunun süperkapasitör davranışını daha ideal kapasitif özelliklere yaklaştırdığını göstermektedir. Ayrıca logaritmik empedans (log|Z|) değerlerinin H₂SO₄ için 3.62 Ω , Na₂SO₄ için 4.02 Ω ve KOH için 4.07 Ω olarak ölçülmesi, asidik ortamın iyon taşınımını daha etkin şekilde kolaylaştırdığını doğrulamaktadır.

En düşük frekans bölgesinde hesaplanan özgül kapasitans değerleri (Şekil 4.13c) karşılaştırıldığında, RN@ZnONPs elektrotunun 1 M H₂SO₄ ortamında 145.06 Fg⁻¹, 1 M KOH ortamında 93.46 Fg⁻¹ ve 1 M Na₂SO₄ ortamında 75.44 Fg⁻¹ değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, asidik ortamın RN@ZnONPs hibrit elektrotu için daha yüksek iyon iletkenliği, düşük iç direnç ve gelişmiş elektrokimyasal aktivite sağladığını göstermektedir.

Genel olarak, EIS verileri H₂SO₄ ortamında RN@ZnONPs elektrodunun hem düşük ESR hem de yüksek özgül kapasitans değerleriyle optimize edilmiş bir süperkapasitör performansı sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, asidik ortamın elektrokimyasal enerji depolama sistemleri için en uygun çalışma koşullarını sağladığını bir kez daha doğrulamaktadır.



Şekil 4.13. Farklı elektrolit ortamlarında RN@ZnONPs tabanlı süperkapasitörün elektrokimyasal empedans analizi: (a) Nyquist eğrileri, (b) Bode faz diyagramları ve (c) hesaplanan özgül kapasitans değerleri.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, RN meyve özütü kullanılarak çevre dostu yeşil sentez yöntemiyle ZnO nanopartikülleri başarıyla elde edilmiş ve RN@ZnONPs adıyla süperkapasitör elektrot malzemesi olarak değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen karakterizasyon ve elektrokimyasal analizler, biyogenik ZnO nanopartiküllerinin hem yapısal hem de elektrokimyasal açıdan üstün özellikler sergilediğini ortaya koymuştur.

Spektral ve morfolojik karakterizasyon bulguları, RN özütündeki fenolik bileşikler, flavonoidler ve organik asitlerin sentez sürecinde indirgeme ve kaplama ajanı olarak görev yaptığını göstermiştir. FTIR ve UV-Vis analizleri, ZnO nanopartiküllerinin oluşumunu ve bitkisel bileşenlerle etkileşimini doğrulamış; XRD analizi, elde edilen nanopartiküllerin yüksek kristalliliğe sahip altıgen wurtzite fazında olduğunu ortaya koymuştur. SEM ve EDX analizleri, partiküllerin nanometre boyutunda, gözenekli ve kısmen aglomere olmuş bir morfolojiye sahip olduğunu, yüzeylerinde ise RN kaynaklı organik bileşenlerin adsorbe olduğunu göstermiştir. TGA analizleri, 550 °C'nin üzerinde termal kararlılığın korunduğunu, DLS ve zeta potansiyel ölçümleri ise partiküllerin -9.53 mV yüzey yüküyle kolloidal stabilizeye sahip olduğunu doğrulamıştır.

Elektrokimyasal karakterizasyon çalışmaları (CV, GCD ve EIS), RN@ZnONPs hibrit elektrotlarının asidik ortamda üstün enerji depolama performansı gösterdiğini açıkça ortaya koymuştur.

- CV analizlerinde, 1 M H₂SO₄ ortamında 5 mV/s tarama hızında 209.05 F·g⁻¹ özgül kapasitans elde edilmiştir.
- GCD ölçümlerinde, aynı ortamda 0.08 A·g⁻¹ akım yoğunluğunda 315.46 F·g⁻¹ özgül kapasitans değeri kaydedilmiş; 5000 döngü sonunda başlangıç kapasitesinin %90.84'ü korunmuştur.
- EIS analizlerinden elde edilen özgül kapasitans değerleri ise 1 M H₂SO₄, 1 M KOH ve 1 M Na₂SO₄ ortamları için sırasıyla 145.06 F·g⁻¹, 93.46 F·g⁻¹ ve 75.44 F·g⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Aynı analizde belirlenen ESR değerleri 22.45 Ω (H₂SO₄), 46.43 Ω (Na₂SO₄) ve 48.89 Ω (KOH) olup, asidik ortamın daha düşük iç direnç ve daha hızlı iyon taşınımı sağladığını doğrulamaktadır.

Bu sonuçlar, asidik elektrolit ortamında protonların yüksek iletkenliği ve küçük iyon yarıçapı sayesinde gözenekli yapıya kolay difüzyonu ile yük transferinin daha etkin gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca RN özütünden kaynaklanan fonksiyonel grupların redoks katkıları, malzemenin pseudokapasitif davranışını güçlendirerek enerji depolama kapasitesini artırmıştır.

Genel olarak RN@ZnONPs hibrit elektrotları; yüksek özgül kapasitans, düşük iç direnç, mükemmel döngü kararlılığı ve çevre dostu sentez yöntemiyle öne çıkmaktadır. Bu bulgular, bitkisel özütler aracılığıyla gerçekleştirilen yeşil sentez stratejilerinin, sürdürülebilir ve yüksek performanslı enerji depolama sistemleri geliştirilmesinde etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.



KAYNAKLAR

- Abdelbaky, A. S., Abd El-Mageed, T. A., Babalghith, A. O., Selim, S., Mohamed, A. M. H. A. 2022. "Green Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles Using *Pelargonium odoratissimum* (L.) Aqueous Leaf Extract and Their Antioxidant, Antibacterial and Anti-inflammatory Activities". *Antioxidants*, 11(8), 1444.
- Agarwal, H., Shanmugam, V. 2020. "A review on anti-inflammatory activity of green synthesized zinc oxide nanoparticle: Mechanism-based approach". *Bioorganic Chemistry*, 94, 103423.
- Ajay Sharma, Garima Bhardwaj, Jyoti Gaba, D. S. C. 2020. "*Antioxidants in Fruits: Properties and Health Benefits*". (G. A. Nayik & A. Gull, Ed.). Singapore: Springer Singapore.
- Akintelu, S. A., Folorunso, A. S., Folorunso, F. A., Oyebamiji, A. K. 2020. "Green synthesis of copper oxide nanoparticles for biomedical application and environmental remediation". *Heliyon*, 6(7), e04508.
- Alzahrani, E. A., Nabi, A., Kamli, M. R., Albukhari, S. M., Althabaiti, S. A., Al-Harbi, S. A., ... Malik, M. A. 2023. "Facile Green Synthesis of ZnO NPs and Plasmonic Ag-Supported ZnO Nanocomposite for Photocatalytic Degradation of Methylene Blue". *Water*, 15(3), 384.
- Assessment report on *Ribes nigrum* L., folium. y.y. Tarihinde 07 Şubat 2025, adresinden erişildi https://www.ema.europa.eu/en/documents/herbal-report/draft-assessment-report-ribes-nigrum-l-folium_en.pdf
- Bard, A. J., Faulkner, L. R. 2022. "*Electrochemical methods: fundamentals and applications*". Tarihinde adresinden erişildi <https://www.wiley.com/en-us/Electrochemical+Methods%3A+Fundamentals+and+Applications%2C+2nd+Edition-p-9780471043720>
- Bhide, A., Hofmann, J., Katharina Dürr, A., Janek, J., Adelhelm, P. 2014. "Electrochemical stability of non-aqueous electrolytes for sodium-ion batteries and their compatibility with Na 0.7 CoO 2". *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 16(5), 1987–1998.
- Bhojane, P. 2022. "Recent advances and fundamentals of Pseudocapacitors: Materials, mechanism, and its understanding". *Journal of Energy Storage*, 45, 103654.
- Cai, D., Yang, Z., Tong, R., Huang, H., Zhang, C., Xia, Y. 2024. "Binder-Free MOF-Based and MOF-Derived Nanoarrays for Flexible Electrochemical Energy Storage: Progress and Perspectives". *Small*, 20(12).
- Chen, G. Z. 2021. "Linear and non-linear pseudocapacitances with or without diffusion control". *Progress in Natural Science: Materials International*, 31(6), 792–800.
- Chnoor Mohammadi, Sarbast A Mahmud, Shorish M Abdulla, Y. M. 2017. "Green

- synthesis of ZnO nanoparticles using the aqueous extract of *Euphorbia petiolata* and study of its stability and antibacterial properties". *Moroccan Journal of Chemistry*, 476–484.
- D. Kumar, H. Shukla, N. S. 2022. "Antibacterial and morphological studies of plant-mediated synthesized CuO nanoparticles using *Azadirachta indica* (neem) leaf extract", *13*(2), 197–204.
- Demissie, M. G., Sabir, F. K., Edossa, G. D., Gonfa, B. A. 2020. "Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using Leaf Extract of *Lippia adoensis* (Koseret) and Evaluation of Its Antibacterial Activity". *Journal of Chemistry*, 2020, 1–9.
- Ekinci, S., Onat, E., Levent, A., Astan, R. 2025. "Hydrochar-derived activated carbon from *Chenopodium botrys* for dual applications in dye removal and energy storage". *Diamond and Related Materials*, 159, 112834.
- Eleryan, A., Aigbe, U. O., Ukhurebor, K. E., Onyancha, R. B., Hassaan, M. A., Elkatory, M. R., ... El Nemr, A. 2023. "Adsorption of direct blue 106 dye using zinc oxide nanoparticles prepared via green synthesis technique". *Environmental Science and Pollution Research*, 30(26), 69666–69682.
- Faisal, S., Jan, H., Shah, S. A., Shah, S., Khan, A., Akbar, M. T., ... Syed, S. 2021. "Green Synthesis of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles Using Aqueous Fruit Extracts of *Myristica fragrans*: Their Characterizations and Biological and Environmental Applications". *ACS Omega*, 6(14), 9709–9722.
- Gao, H., Wang, B. 2024. "A first-principles study on structural stability and magnetoelectric coupling of two-dimensional BaTiO₃ ultrathin film with Cr and Cu substituting Ti site". *APL Materials*, 12(9).
- Gebre, S. H. 2023. "Bio-inspired Synthesis of Metal and Metal Oxide Nanoparticles: The Key Role of Phytochemicals". *Journal of Cluster Science*, 34(2), 665–704.
- Global-BC-Production-2022-2024. y.y. Tarihiinde 07 Şubat 2025, adresinden erişildi <https://www.blackcurrant-iba.com/wp-content/uploads/2024/07/Global-BC-Production-2022-2024.pdf>
- Gómez Torres, F. del C., Luis Cervantes López, J., López Rodríguez, A. S., Sifuentes Gallardo, P., Ramírez Morales, E., Pérez Hernández, G., ... Díaz Flores, L. L. 2023. "Sol-gel/hydrothermal synthesis of well-aligned ZnO nanorods". *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 62(4), 348–356.
- Gopalakrishnan, A., Badhulika, S. 2020. "Effect of self-doped heteroatoms on the performance of biomass-derived carbon for supercapacitor applications". *Journal of Power Sources*, 480, 228830.
- Gupta, M., Tomar, R. S., Kaushik, S., Mishra, R. K., Sharma, D. 2018. "Effective Antimicrobial Activity of Green ZnO Nano Particles of *Catharanthus roseus*". *Frontiers in Microbiology*, 9.
- Hameed, H., Waheed, A., Sharif, M. S., Saleem, M., Afreen, A., Tariq, M., ... Mahmoud, R. M. 2023. "Green Synthesis of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles from Green Algae

- and Their Assessment in Various Biological Applications". *Micromachines*, 14(5), 928.
- Haque, M., Li, Q., Smith, A. D., Kuzmenko, V., Köhler, E., Lundgren, P., Enoksson, P. 2018. "Thermal influence on the electrochemical behavior of a supercapacitor containing an ionic liquid electrolyte". *Electrochimica Acta*, 263, 249–260.
- Hussain, I., Sahoo, S., Hussain, T., Ahmad, M., Javed, M. S., Lamiel, C., ... Zhang, K. 2023. "Theoretical and Experimental Investigation of In Situ Grown MOF-Derived Oriented Zr-Mn-oxide and Solution-Free CuO as Hybrid Electrode for Supercapacitors". *Advanced Functional Materials*, 33(7).
- Ibukun, O., Jeong, H. K. 2019. "Effects of Aqueous Electrolytes in Supercapacitors". *New Physics: Sae Mulli*, 69(2), 154–158.
- Javed, M. S., Mateen, A., Hussain, I., Ali, S., Asim, S., Ahmad, A., ... Han, W. 2023. "The quest for negative electrode materials for Supercapacitors: 2D materials as a promising family". *Chemical Engineering Journal*, 452, 139455.
- Javed, M. S., Najam, T., Hussain, I., Idrees, M., Ahmad, A., Imran, M., ... Han, W. 2023. "Fundamentals and Scientific Challenges in Structural Design of Cathode Materials for Zinc-Ion Hybrid Supercapacitors". *Advanced Energy Materials*, 13(3).
- Jeevanandam, J., Kiew, S. F., Boakye-Ansah, S., Lau, S. Y., Barhoum, A., Danquah, M. K., Rodrigues, J. 2022. "Green approaches for the synthesis of metal and metal oxide nanoparticles using microbial and plant extracts". *Nanoscale*, 14(7), 2534–2571.
- Jiang, L., Shi, H., Han, M., Zhang, Y., Liang, J., Chen, J., ... Sheng, L. 2024. "Rearrangement of Pore Structure-Enabled Micropore-Dominant N,O Co-Doped Carbon for Ultrafast Charge/Discharge Rate Supercapacitors at Commercial-Scale Mass Loading". *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(51), 18422–18433.
- Kamal, A., Akhtar, Muhammed Saeed Nazish, M., Tahira, K. T., RAHMAN, K. U., IQBAL, A., KAMAL, K., ... ZAMAN, W. 2024. "Plant phytochemicals-mediated synthesis of zinc oxide nanoparticles with antimicrobial, pharmacological, and environmental applications". *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 96(4).
- Kaushik, S., Chand, P., Sharma, S. 2025. "Nanoarchitectonics for ultrahigh capacitance with superior energy and power density of sustainable zeolitic imidazolate framework-67 in redox additive electrolyte". *Materials Research Bulletin*, 186, 113348.
- Khan, M., Ware, P., Shimpi, N. 2021. "Synthesis of ZnO nanoparticles using peels of *Passiflora foetida* and study of its activity as an efficient catalyst for the degradation of hazardous organic dye". *SN Applied Sciences*, 3(5), 528.
- Lakshmi, K. C. S., Vedhanarayanan, B. 2023. "High-Performance Supercapacitors: A Comprehensive Review on Paradigm Shift of Conventional Energy Storage Devices". *Batteries*, 9(4), 202.
- Lazanas, A. C., Prodromidis, M. I. 2023. "Electrochemical Impedance Spectroscopy—A Tutorial". *ACS Measurement Science Au*, 3(3), 162–193.

- Lee, Y., Lee, J.-Y. 2019. "Blackcurrant (*Ribes nigrum*) Extract Exerts an Anti-Inflammatory Action by Modulating Macrophage Phenotypes". *Nutrients*, 11(5), 975.
- Levent, A., Saka, C. 2024a. "Enhanced electrochemical performance of ZnO@sulphur-doped carbon particles for use in supercapacitors". *Journal of Energy Storage*, 78(November 2023), 110120.
- Levent, A., Saka, C. 2024b. "Mesoporous carbon particles by biomass waste based on sulfonation and copper oxide functionalization as efficient and stable electrode material for supercapacitor". *Environmental Science and Pollution Research*, 31(39), 52511–52522.
- Levent, A., Saka, C. 2025a. "Stable electrode material for use in supercapacitor with iodine doping after sulfonation of mesoporous activated carbon particles based on microalgae biomass". *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(14), 20803–20816.
- Levent, A., Saka, C. 2025b. "Tunable energy storage in acidic and alkaline electrolytes using a NiO-embedded N,P-Doped biomass-derived electrode". *Biomass and Bioenergy*, 202, 108225.
- Li, X., Xiong, S., Li, G., Xiao, S., Zhang, C., Ma, Y. 2023. "Effect of microstructure on electrochemical performance of electrode materials for microsupercapacitor". *Materials Letters*, 346, 134481.
- Liang, R., Du, Y., Xiao, P., Cheng, J., Yuan, S., Chen, Y., ... Chen, J. 2021. "Transition Metal Oxide Electrode Materials for Supercapacitors: A Review of Recent Developments". *Nanomaterials*, 11(5), 1248.
- Liu, L., Zhu, L., Wang, Y., Guan, X., Zhang, Z., Li, H., ... Ma, T. 2025. "Starfish-Inspired Solid-State Li-ion Conductive Membrane with Balanced Rigidity and Flexibility for Ultrastable Lithium Metal Batteries". *Angewandte Chemie International Edition*, 64(7).
- Manohar, A., Vijayakanth, V., Vattikuti, S. V. P., Reddy, G. R., Kim, K. H. 2023. "A brief review on Zn - based materials and nanocomposites for supercapacitor applications". *Journal of Energy Storage*, 68, 107674.
- Meena, J., Sivasubramaniam, S. shankari, David, E., K, S. 2024. "Green supercapacitors: review and perspectives on sustainable template-free synthesis of metal and metal oxide nanoparticles". *RSC Sustainability*, 2(5), 1224–1245.
- Mendhe, A., Panda, H. S. 2023. "A review on electrolytes for supercapacitor device". *Discover Materials*, 3(1), 29.
- Nayak, S., Sajankila, S. P., Rao, C. V., Hegde, A. R., Mutalik, S. 2021. "Biogenic synthesis of silver nanoparticles using *Jatropha curcas* seed cake extract and characterization: evaluation of its antibacterial activity". *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 43(24), 3415–3423.
- Oyelade, O. V., Idris, A., Mohammed, M., Gimba, S., Felix, J., Okike, O., ... Ezema, F. I. 2025. "Green synthesis of some selected transition metal oxide nanoparticles for

- energy storage applications in supercapacitors". *Journal of the Indian Chemical Society*, 102(5), 101666.
- Pasieczna-Patkowska, S., Cichy, M., Flieger, J. 2025. "Application of Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy in Characterization of Green Synthesized Nanoparticles". *Molecules*, 30(3), 684.
- Patel, A., Patel, S. K., Singh, R. S., Patel, R. P. 2024. "Review on recent advancements in the role of electrolytes and electrode materials on supercapacitor performances". *Discover Nano*, 19(1), 188.
- Pedro Aguiar dos Santos, J., Cesar Rufino, F., Yutaka Ota, J. I., Fernandes, R. C., Vicentini, R., Pagan, C. J. B., ... Zanin, H. 2023. "Best practices for electrochemical characterization of supercapacitors". *Journal of Energy Chemistry*, 80, 265–283.
- Ratha, S., Samantara, A. K. 2018. *Supercapacitor: Instrumentation, Measurement and Performance Evaluation Techniques*. Singapore: Springer Singapore.
- Raza, W., Ali, F., Raza, N., Luo, Y., Kim, K.-H., Yang, J., ... Kwon, E. E. 2018. "Recent advancements in supercapacitor technology". *Nano Energy*, 52, 441–473.
- Reece, R., Lekakou, C., Smith, P. A. 2020. "A High-Performance Structural Supercapacitor". *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(23), 25683–25692.
- Ruiz, V., Santamaría, R., Granda, M., Blanco, C. 2009. "Long-term cycling of carbon-based supercapacitors in aqueous media". *Electrochimica Acta*, 54(19), 4481–4486.
- Sah, M. K., Ettarhouni, Z. O., Pathak, R., Gawad, J., Bonde, C., Arya, S. P., Bhattarai, A. 2025. "Green Chemistry: Strategies and Sustainable Approaches for Bridging UN SDGS". *ChemistrySelect*, 10(25).
- Saini, S., Chand, P. 2022. "Effect of aqueous electrolytes on h-WO₃ nanorods as an electrode material for supercapacitor application". *Chemical Physics Letters*, 802, 139760.
- Saka, C., Levent, A. 2024a. "Fabrication of nitrogen and ZnO doped on carbon particles obtained from waste biomass and their use as supercapacitor electrodes for energy storage". *International Journal of Hydrogen Energy*, 90, 1070–1083.
- Saka, C., Levent, A. 2024b. "High-performance pseudo-capacitance supercapacitor with highly mesoporous fluorine doped polymeric carbon nitride nanosheets as electrode material". *Diamond and Related Materials*, 148, 111504.
- Salem Alsaiani, N., Ahmad, M., Shaheen, I., Ali, I., Amara, U., Mohammed Alzahrani, F., ... Hussain, I. 2023. "Three-dimensional flower-like nanocomposites based on ZnO/NiO as effective electrode materials for supercapacitors". *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 930, 117158.
- Saygılı, H., Saygılı, G. A., Levent, A. 2025. "Design of microwave-supported activated carbon derived from lentil processing residual for efficient heavy metals adsorption and supercapacitor applications". *Talanta*, 293, 128068.

- Sekoai, P. T., Ouma, C. N. M., du Preez, S. P., Modisha, P., Engelbrecht, N., Bessarabov, D. G., Ghimire, A. 2019. "Application of nanoparticles in biofuels: An overview". *Fuel*, 237, 380–397.
- Senthilkumar, N., Nandhakumar, E., Priya, P., Soni, D., Vimalan, M., Vetha Potheher, I. 2017. "Synthesis of ZnO nanoparticles using leaf extract of *Tectona grandis* (L.) and their anti-bacterial, anti-arthritic, anti-oxidant and in vitro cytotoxicity activities". *New Journal of Chemistry*, 41(18), 10347–10356.
- Shaheen, I., Ahmad, K. S., Zequine, C., Gupta, R. K., Thomas, A. G., Malik, M. A. 2021. "Facile ZnO-based nanomaterial and its fabrication as a supercapacitor electrode: synthesis, characterization and electrochemical studies". *RSC Advances*, 11(38), 23374–23384.
- Srividhya, G., Ponpandian, N. 2024. "Pseudocapacitance: Mechanism and Characteristics" (ss. 39–56).
- Tan, C. S., Leow, S. Y., Ying, C., Tan, C. J., Yoon, T. L., Jingying, C., Yam, M. F. 2021. "Comparison of FTIR spectrum with chemometric and machine learning classifying analysis for differentiating guan-mutong a nephrotoxic and carcinogenic traditional chinese medicine with chuan-mutong". *Microchemical Journal*, 163, 105835.
- Vu, C. M., Ghotekar, S., Viet, N. M., Dabhane, H., Oza, R., Roy, A. 2022. "Green Synthesis of Plant-Assisted Manganese-Based Nanoparticles and Their Various Applications". *Içinde Plant and Nanoparticles* (ss. 339–354). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Wang, J. 2023. *"Analytical Electrochemistry"*. Wiley-Blackwell Publishing Ltd.
- Wang, Y., Zhang, L., Hou, H., Xu, W., Duan, G., He, S., ... Jiang, S. 2021. "Recent progress in carbon-based materials for supercapacitor electrodes: a review". *Journal of Materials Science*, 56(1), 173–200.
- Xiong, P., Sun, B., Sakai, N., Ma, R., Sasaki, T., Wang, S., ... Wang, G. 2020. "2D Superlattices for Efficient Energy Storage and Conversion". *Advanced Materials*, 32(18).
- Xu, M., Sun, M., Rehman, S. ur, Ge, K., Hu, X., Ding, H., ... Bi, H. 2021. "One-pot synthesis of CoO–ZnO/rGO supported on Ni foam for high-performance hybrid supercapacitor with greatly enhanced cycling stability". *Chinese Chemical Letters*, 32(6), 2027–2032.
- Yang, L., Chen, L., Yang, D., Yu, X., Xue, H., Feng, L. 2018. "NiMn layered double hydroxide nanosheets/NiCo₂O₄ nanowires with surface rich high valence state metal oxide as an efficient electrocatalyst for oxygen evolution reaction". *Journal of Power Sources*, 392, 23–32.
- Yassin, M. T., Mostafa, A. A.-F., Al-Askar, A. A., Al-Otibi, F. O. 2022. "Facile Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles with Potential Synergistic Activity with Common Antifungal Agents against Multidrug-Resistant Candidal Strains". *Crystals*, 12(6), 774.

- Zeng, Y., Jin, J., Gu, R., Cheng, X., Xu, M., Gao, L., Miao, X. 2024. "A Fast and High Endurance Phase Change Memory Based on In-Doped Sb₂Te₃". *ACS Applied Nano Materials*, 7(12), 13983–13990.
- Zhang, G., Xiong, T., Yan, M., He, L., Liao, X., He, C., ... Mai, L. 2018. "α-MoO₃- by plasma etching with improved capacity and stabilized structure for lithium storage". *Nano Energy*, 49, 555–563.
- Zhang, J., Wang, F., Zhou, J., Zhang, Z., Li, J., Chen, W. 2025. "Role of thermal and electric fields in the failure mechanism of metallized film capacitors: insights from molecular chain dynamics within polymer dielectrics". *Journal of Physics D: Applied Physics*, 58(8), 085503.
- Zhu, Z., Li, J., Ouyang, T., Balogun, M.-S. 2023. "Carbon- and transition metal-based matrixes as self-supportive anodes for high areal capacity lithium ion batteries". *Current Opinion in Electrochemistry*, 39, 101260.
- Zou, K., Deng, Y., Chen, J., Qian, Y., Yang, Y., Li, Y., Chen, G. 2018. "Hierarchically porous nitrogen-doped carbon derived from the activation of agriculture waste by potassium hydroxide and urea for high-performance supercapacitors". *Journal of Power Sources*, 378, 579–588.